Digitized by Google

TRAITÉ
D'ÉLECTRICITÉ
THÉORIQUE ET APPLIQUÉE
II

Digitized by Google

CET OUVRAGE SE TROUVE AUSSI

A GENÈVE

CHEZ JOEL CHERBULIEZ, LIBRAIRE

Rue de la Cité

Paris. — Imprimerie de Gustave GRATIOT, rue Mazarine, 30.

Digitized by Google

TRAITÉ D'ÉLECTRICITÉ

THÉORIQUE ET APPLIQUÉE

G 7 325

PAR

A. DE LA RIVE

PROFESSEUR EMÉRITE DE L'ACADÉMIE DE GENÈVE, DOCTEUR HONORAIRE DE L'UNIVERSITÉ DE PRAGUE
CORRESPONDANT DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES ET DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE DE PARIS,
ASSOCIÉ ÉTRANGER DE LA SOCIÉTÉ ROYALE DE LONDRES;
DES ACADÉMIES DE BERLIN, DE TURIN, DE BRUXELLES ET DE NAPLES;
MEMBRE DES SOCIÉTÉS DES ARTS ET DES SCIENCES NATURELLES DE GENÈVE, ETC.

Avec figures intercalées dans le texte

TOME DEUXIÈME

BIBLIOTECA NAZIONALE FIRENZE

A PARIS
CHEZ J.-B. BAILLIÈRE
LIBRAIRE DE L'ACADÉMIE IMPÉRIALE DE MÉDECINE
RUE HAUTEFEUILLE, 19
A LONDRES, CHEZ H. BAILLIÈRE, 219, REGENT STREET
A NEW-YORK, CHEZ H. BAILLIÈRE, 290, BROADWAY
A MADRID, CHEZ C. BAILLY-BAILLIÈRE, CALLE DEL PRINCIPE, 11

1856

BIBLIOTHECA FLORENTINA

AVERTISSEMENT

Il y aura bientôt deux ans qu'a paru le premier volume du *Traité d'Électricité théorique et appliquée;* ce long intervalle entre la publication de ce volume et du suivant tient au désir que j'ai eu de ne faire paraître le second, qu'après être parvenu à donner une théorie satisfaisante de la pile voltaïque. J'espère avoir résolu cette question, difficile et contestée, d'une manière qui sera acceptée par ceux qui se sont occupés de ce sujet difficile.

J'ai encore à me justifier sur un autre point : c'est la nécessité où je me trouve de publier un troisième volume. Le développement considérable que j'ai dû donner, à cause de leur importance et du nombre considérable de travaux dont ils ont été l'objet, aux sujets traités dans ce second volume, m'a mis dans l'impossibilité d'y comprendre les applications de l'électricité. Je me suis donc décidé à leur

Digitized by Google

consacrer un troisième volume, ce qui me permettra de leur donner l'étendue qu'elles méritent.

Ce changement dans mon plan primitif m'a conduit à en introduire un second, savoir : l'addition d'une nouvelle partie aux six dont devait se composer le Traité. Cette partie, qui sera la sixième, les applications devenant la septième, aura pour objet *les rapports de l'électricité avec les phénomènes naturels*, et sera en tête du troisième volume. On peut la considérer comme étant déjà une sorte d'application des théories et des phénomènes électriques exposés dans les deux premiers volumes. Elle renfermera l'étude de l'électricité produite par les actions physiologiques, soit dans les animaux, soit dans les végétaux; celle de l'électricité atmosphérique et du magnétisme terrestre, ainsi que des phénomènes météorologiques qui en dépendent.

Sans doute, les points que je viens d'énumérer auraient pu être traités dans le chapitre relatif aux sources de l'électricité; mais, indépendamment de l'impossibilité où j'aurais été, si j'avais adopté ce parti, de m'occuper avec un développement suffisant des phénomènes naturels auxquels ils sont liés, il est en même temps plus rationnel de leur consacrer une partie spéciale du *Traité d'Électricité*. En effet, les sources naturelles de l'électricité ne sont point du même genre que les artificielles (actions calorifiques, mécaniques ou chimiques); ce sont des manifestations électriques dues à la mise en activité par la nature elle-même, probablement des mêmes forces, mais sous des formes différentes, que celles au moyen desquelles la main de l'homme produit l'électricité. Ce sont donc des phénomènes

complexes dont l'étude est plutôt une application, comme nous l'avons dit, qu'une continuation de celle des sources électriques.

Le troisième volume contiendra donc deux parties distinctes consacrées : l'une aux rapports de l'électricité avec les phénomènes naturels; l'autre aux applications proprement dites, soit à l'art de guérir, soit aux arts chimiques, soit aux arts mécaniques. Ce volume paraîtra dans le courant de l'année 1856.

Genève, 5 décembre 1855.

Digitized by Google

ERRATA.

N. B Nous nous bornerons dans l'errata à la correction des fautes graves qui peuvent altérer le sens du texte, sans nous arrêter aux simples erreurs typographiques que le lecteur peut facilement rectifier lui-même.

Page	14,	ligne	5, de diaphragmes,	*lisez* : de deux diaphragmes.
—	71,	—	7, d'une même feuille	— d'une mince feuille.
—	71,	—	35, isolant c'est parfait,	— un isolement parfait.
—	96,	—	18, comparée de e,	— composée de *s*.
—	106,	—	35, 200 à 10°,	— 20° à 10°.
—	164,	—	21, proportionnelle,	— inversement proportionnelle.
—	168,	—	29, de sa tenacité,	— de sa tenuité.
—	197,	—	1, 35 millim.,	— 15 millim.
—	309,	—	4, le protochlorure d'antimoine,	— le perchlorure d'antimoine.
—	313,	—	10, ou le zinc qui,	— ou le zinc, qui.
—	315,	—	7, celui d'oxyde,	— celui d'acide.
—	327,	—	25, oppose où,	— oppose à celui ou.
—	368,	—	26, au-dessus de l'eau,	— au-dessous de l'eau.
—	369,	—	3, au-dessus de,	— au-dessous de.
—	440,	—	5, idiopathique que,	— idiopathique, que.
—	448,	—	26, de 0,600,	— de 0gr., 600.
—	456,	—	16 et 17, Nous allons sommairement examiner ces différentes sources.	— Nous examinerons dans cette cinquième partie les premières sources
—	471,	—	2, le métal,	— le cristal.
—	473,	—	9, os d'une,	— *ss* et d'une.
—	498,	—	11, 1000°,	— 100°.
—	501,	—	19, s'appliquer,	— s'expliquer.
—	547,	—	24, d'électricité possible,	— d'électricité produite.
—	626,	—	31, *supprimez* : la proportionnalité entre.	
—	662,	—	35, chlorure d'or,	— chlorure de platine.
—	693,	—	27, trois décimètres,	— trois centimètres.
—	728,	—	16, $i' = \frac{a}{r}$,	— $i = \frac{e}{r}$ (i à la place de i'.)
—	728,	—	20, $i = \frac{e}{r + l'}$,	— $i' = \frac{a}{r + l}$ (i' à la place de i).
—	728,	—	28, $\frac{e}{r + i'}$,	— $\frac{a}{r + l}$ (l à la place de l').
—	741,	—	7 en *remontant* : 8, 10,	— 3, 10.
—	779,	—	22, les forces électromotrices,	— la force électromotrice.

Digitized by Google

TRAITÉ
D'ÉLECTRICITÉ
THÉORIQUE ET APPLIQUÉE

QUATRIÈME PARTIE
TRANSMISSION DE L'ÉLECTRICITÉ

CHAPITRE PREMIER.
PROPAGATION DE L'ÉLECTRICITÉ.

§ 1. Notions générales sur la propagation de l'électricité.

Après avoir étudié les lois générales de l'électricité, soit à l'état statique, soit à l'état dynamique, nous sommes appelés à nous occuper des phénomènes plus spéciaux qui résultent de la transmission de cet agent à travers différents milieux.

Le caractère fondamental de ces phénomènes, qui les distingue de ceux qui ont fait l'objet de notre étude dans la deuxième et la troisième partie, c'est qu'ils dépendent essentiellement de la nature particulière du milieu que l'électricité traverse, tandis que les autres qui en sont indépendants et demeurent les mêmes, quel que soit ce milieu, constituent les lois générales de l'électricité.

Avant d'aborder l'examen des effets variés et nombreux que produit dans les corps la transmission de l'électricité, nous nous occuperons dans ce premier chapitre de cette transmission elle-même, considérée soit dans la manière dont elle a lieu, soit dans l'influence qu'exerce sur elle le milieu à travers lequel elle s'opère. Quelques notions générales sur la propagations de l'électricité nous serviront d'introduction à cette étude.

Le mot propagation emporte avec lui l'idée de mouvement,

et pour nous l'électricité en mouvement, c'est l'électricité dans cet état qui résulte de la réunion, soit neutralisation des deux principes électriques opposés. Nous avons vu que cette réunion peut être *continue* ou *instantanée*, que dans le premier cas elle constitue un courant, dans le second une simple décharge. Une succession très-rapide de décharges, appelées quelquefois courants instantanés, peut former un courant continu, de même que ce dernier peut être décomposé en une série de courants discontinus au moyen d'un rhéotome. Ce qui caractérise le courant qui quelquefois ne dure qu'un instant et est alors dit temporaire, c'est qu'il agit sur le galvanomètre magnétique, tandis que la décharge, qui est complétement instantanée, n'exerce aucune action sur cet instrument, tout en produisant un grand nombre d'autres effets. Quand on veut étudier les lois de la propagation, c'est des courants qu'il faut principalement faire usage, sauf dans quelques cas exceptionnels où l'emploi des décharges devient nécessaire pour découvrir certaines particularités du phénomène.

La manière la plus simple d'envisager la propagation de l'électricité, c'est de la considérer dans un corps conducteur qui réunit les deux pôles d'une pile voltaïque; les deux électricités qui sont constamment dégagées à chacun des deux pôles se neutralisent d'une manière continue, à mesure qu'elles sont produites, à travers le conducteur, et constituent le courant dont nous avons déjà étudié dans la troisième partie les propriétés extérieures ou les lois générales. Ce courant se propageant dans la masse entière du conducteur, la direction de sa propagation est déterminée par la forme même du conducteur; elle sera rectiligne si ce conducteur est en ligne droite, curviligne s'il est en ligne courbe.

Quand le conducteur n'a pas des dimensions bien déterminées, qu'il est à peu près indéfini dans tous les sens, comme le serait par exemple un bras de mer dans l'eau duquel on plongerait, à une certaine distance l'un de l'autre, les deux pôles d'une pile, le courant se dissémine dans toutes les directions, comme nous le verrons plus loin, mais en étant toujours assujetti à cette condition que tous les filets infiniment minces dans les-

quels on peut le supposer divisé, aboutissent par leurs extrémités aux deux pôles. On voit par là qu'il est impossible d'assimiler la propagation de l'électricité dans un milieu conducteur à celle de la lumière ou de la chaleur rayonnante; car dans ces deux derniers cas, la propagation émane d'un seul centre rayonnant et a lieu dans toutes les directions en ligne droite, tant du moins que le milieu ne change pas; tandis que, lorsqu'il s'agit de l'électricité dynamique, au lieu d'un seul, il y a deux points qu'on peut considérer également comme centres d'émanation, savoir les deux pôles où se trouvent constamment amenées et d'où partent aussi constamment les électricités contraires dont la réunion forme le courant qui se propage dans le milieu ambiant. D'ailleurs M. Wartmann a démontré par un grand nombre d'expériences que dans sa propagation, l'électricité dynamique n'est susceptible ni de réflexion, ni de réfraction, et que par conséquent toute analogie qu'on voudrait établir entre elle et la lumière ou la chaleur rayonnante est complétement dénuée de fondement.

On peut toutefois se demander si l'électricité à l'état statique ou de tension telle qu'elle se trouve sur un corps isolé, n'est pas susceptible de se propager dans le milieu ambiant; il ne s'agirait dans ce cas évidemment que d'une seule électricité, la positive ou la négative. On sait qu'un corps isolé et électrisé perd plus ou moins vite son électricité suivant l'état de l'air ambiant et la faculté isolante plus ou moins grande de son support; Belli et après lui d'autres physiciens ont même prouvé que l'électricité négative se dissipe plus facilement dans les mêmes circonstances que la positive. Or le seul fait que la tension électrique du corps électrisé diminue, prouve que l'électricité se propage hors de ce corps. Il y a plus; Faraday, dans ses recherches sur l'induction statique, a démontré, comme nous l'avons vu dans le chapitre VI de la deuxième partie, que cette propagation ne s'opère point à distance, mais qu'elle a lieu par l'intermédiaire des corps, même de ceux qui, en apparence, sont les plus isolants; ces corps se polarisent sous l'influence du corps électrisé, c'est-à-dire que chacune de leurs particules présentent les deux électricités séparées l'une de l'autre, de

façon que, si le corps électrisé est positif, les électricités négatives de chaque particule sont toutes tournées du côté du corps et les positives du côté opposé; c'est ce qui constitue l'induction. Il arrive même quelquefois que les électricités contraires des particules contiguës se neutralisent, ce qui détermine une véritable transmission de l'électricité, que Faraday appelle conduction par opposition à la simple induction qui, suivant lui, précède toujours la conduction. Il résulte de là que la distinction entre les corps isolants et les corps conducteurs n'est point absolue, car il arrive également, comme nous le verrons, que les conducteurs même les meilleurs opposent toujours une certaine résistance au passage de l'électricité, et le retard qu'elle éprouve est du même genre, quoiqu'à un degré bien moindre, que celui qu'on observe même avec les corps les plus isolants, tels que le blanc de baleine, la laque ou le soufre.

M. Matteucci, à la suite d'un grand nombre d'expériences faites sur la propagation de l'électricité dans les corps solides isolants, a confirmé et étendu les résultats obtenus par Faraday. Il a constaté dans tous les corps isolants, mais à des degrés différents suivant leur nature, le développement de l'état électrique moléculaire dont nous venons de parler, de façon que chaque molécule a les deux états électriques contraires développés sur ses faces opposées. Il a montré également que ces états électriques moléculaires peuvent se détruire, et par conséquent l'électricité se propager soit à la surface, soit dans l'intérieur du corps. Le pouvoir isolant ne consiste donc que dans la résistance plus ou moins grande opposée par les corps qui en sont doués à la destruction des états électriques moléculaires par l'entrée ou la sortie du fluide électrique des molécules mêmes; résistance qui dépend de plusieurs circonstances tenant soit à la nature, aux dimensions et aux autres conditions physiques du corps, soit à l'intensité de l'électricité dont est chargé le corps isolé. Nous reviendrons plus loin, en nous occupant d'une manière plus spéciale de la propagation de l'électricité dans les corps isolants, sur les fait d'où M. Matteucci tire les conclusions que nous venons de reproduire.

Nous pouvons donc admettre, comme nous l'avons déjà exposé

incidemment dans le chapitre V de la troisième partie, page 445, que la propagation de l'électricité a lieu dans tous les cas par une neutralisation des électricités opposées des particules du corps à travers lequel la transmission s'opère; neutralisation toujours précédée d'une induction moléculaire, c'est-à-dire de la séparation de ces électricités dans chaque molécule. Dans les corps très-bons conducteurs, ces inductions et neutralisations successives s'opèrent avec une très-grande rapidité; dans les corps isolants elles s'opèrent moins vite et d'autant plus lentement que le corps est plus isolant. On voit donc qu'il n'y a jamais propagation d'une seule électricité, et que la seule différence qui existe entre le cas où le milieu communique avec un seul corps électrisé et celui où il est placé entre deux corps chargés d'électricités contraires, c'est que dans le second il y a un effet double de celui qui a lieu dans le premier; car il est facile de voir que les deux effets doivent s'ajouter, loin de se détruire. En effet, si l'on suppose (fig. 181) deux séries de molé-

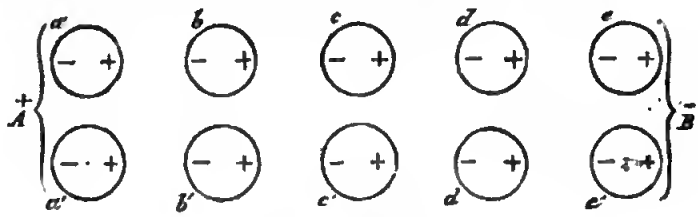


Fig. 181.

cules entre le corps A chargé d'électricité positive et le corps B chargé d'électricité négative, la série des molécules *a*, *b*, *c*, *d*, *e*, sur lesquelles agit A, sera polarisée exactement comme la série *a'*, *b'*, *c'*, *d'*, *e'*, sur lesquelles agit B; mais en fait les deux séries, ou plutôt toutes les séries de molécules comprises entre A et B, sont soumises à l'action simultanée de A et de B, ce qui doit produire sur elles un effet double de celui qui résulterait de l'action seule de A ou de B. Ce principe est également vrai, qu'il s'agisse d'un courant continu ou d'une simple décharge.

La direction suivant laquelle s'opère la propagation quand il y a en présence deux corps chargés d'électricités contraires, comme les deux pôles d'une pile, est déterminée par la direc-

tion suivant laquelle sont placées les molécules consécutives interposées entre ces deux corps et à travers lesquelles s'opère cette propagation. Quand il n'y a qu'un corps électrisé, c'est le sol ou plutôt le conducteur le plus rapproché, communiquant avec le sol, qui fait l'office du second corps électrisé, ainsi que cela résulte de l'analyse que nous venons de faire du phénomène. Il ne faut pas croire que ce soit toujours dans l'un et l'autre cas les particules qui composent la partie la plus conductrice du milieu interposé qui soient celles uniquement à travers lesquelles la propagation ait lieu; il arrive dans certaines circonstances que cette propagation a lieu aussi à travers les autres. Ainsi M. Harris a remarqué que si l'on fait passer la décharge d'une batterie de bouteilles de Leyde de 25 pieds carrés fortement chargée, à travers un fil de fer fin renfermé dans un réservoir où l'air a été très-raréfié, le fil ne paraît nullement affecté, mais l'air ambiant devient lumineux, tandis qu'en faisant rentrer l'air dans le récipient le fil est aussitôt fondu, lors même qu'on emploie une batterie de 5 pieds carrés seulement. Il l'est également dans l'air raréfié si, au lieu d'une batterie de bouteilles de Leyde, on emploie une pile voltaïque. Ces différences tiennent à ce qu'il n'y a rien d'absolu dans la faculté de conduction des corps, et qu'elles dépendent de diverses conditions relatives soit à l'état du milieu, soit à l'origine, c'est-à-dire à l'intensité de l'électricité.

La décomposition et la recomposition des deux électricités dans chaque particule du milieu à travers lequel la propagation de l'électricité s'opère, peut être accompagnée d'effets, soit chimiques, soit calorifiques, soit lumineux, soit physiologiques, suivant la nature de ce milieu et les conditions physiques dans lesquelles il se trouve, et suivant le mode de production de l'agent électrique. Il peut aussi arriver dans quelques cas, lorsque le milieu offre une certaine résistance à cette neutralisation des électricités opposées des particules consécutives, que ces particules éprouvent un déplacement mécanique, d'où résulte un mouvement dans le milieu s'il est liquide ou gazeux, et une rupture s'il est solide. Nous examinerons avec soin ces différents phénomènes, dont l'étude nous fournira une confir-

mation de la manière dont nous expliquons le mode de propagation de l'électricité.

Après ce premier coup d'œil général que nous venons de jeter sur la propagation de l'électricité, nous allons d'abord chercher dans le présent chapitre les lois auxquelles elle est soumise dans les bons conducteurs solides et liquides, puis nous déterminerons l'influence qu'exerce sur elle la nature particulière de ces bons conducteurs et les conditions physiques dans lesquelles ils se trouvent. Nous étudierons ensuite cette même propagation dans les solides et liquides qui sont isolants ou plutôt conducteurs imparfaits, ainsi que dans les fluides élastiques et dans le vide. Nous terminerons cet examen par l'exposition des recherches qui ont été faites sur la vitesse même avec laquelle a lieu la propagation; tel est l'objet de ce premier chapitre.

Les effets chimiques, physiques et physiologiques qui accompagnent la transmission de l'électricité seront l'objet des chapitres suivants.

Nous ferons usage, dans l'étude que nous allons aborder, des voltamètres que nous avons décrits dans la première partie de cet ouvrage, ainsi que des galvanomètres magnétiques à la description desquels nous avons consacré le chapitre IV de la troisième partie. Nous emploierons, comme sources d'électricité, soit la machine électrique, soit la pile voltaïque, soit la machine magnéto-électrique qui produit des courants d'induction; ces trois appareils, quoique capables chacun, comme nous le verrons plus tard, de produire l'électricité sous toutes les formes, sont cependant plus particulièrement aptes, la machine électrique, à la produire sous forme de décharges; la pile, sous forme de courants continus; la machine magnéto-électrique, sous forme de courants discontinus. C'est pourquoi nous nous servirons plus volontiers de l'un ou de l'autre des trois appareils, suivant que nous aurons besoin de l'électricité sous l'une ou l'autre de ces trois formes. Nous serons dirigés dans notre choix, également par la nature des corps à travers lesquels nous sommes appelés à opérer la transmission de l'électricité et par celle des effets que nous voudrons y produire.

§ 2. Lois de la propagation de l'électricité dans les bons conducteurs.

Nous venons de voir qu'il n'y a pas de conducteur parfait de l'électricité dans le sens absolu, mais que tous les corps, même ceux qui paraissent la conduire le mieux, opposent une certaine résistance à sa propagation. Toutefois, nous considérerons comme bons conducteurs tous ceux qui permettent une propagation de l'électricité assez rapide pour que le courant qui en résulte puisse agir sur l'aiguille aimantée, et, par conséquent, produire les phénomènes généraux de l'électro-dynamique. Il est vrai que cette définition a encore l'inconvénient de n'être pas absolue, car le même corps, l'eau pure, par exemple, peut être classée ou n'être pas classée dans les bons conducteurs, suivant l'appareil qu'on emploie pour produire l'électricité et suivant le mode de communication qu'on établit entre elle et cet appareil, et enfin suivant les conditions physiques dans lesquelles elle se trouve. Mais cela nous importe peu, une fois qu'il s'agit seulement de déterminer les lois de la propagation elle-même; c'est dans le paragraphe suivant, consacré à l'étude des pouvoirs conducteurs des différents corps, que nous devrons avoir égard à ces anomalies. Il nous importe peu également que l'appareil dont nous allons nous servir pour la production de l'électricité soit d'une espèce ou d'une autre. Les seules conditions auxquelles il doive satisfaire, c'est d'être assez puissant pour nous donner, avec le conducteur dont nous ferons usage, un courant continu et capable d'agir directement et, au besoin, sans l'emploi du galvanomètre, sur l'aiguille aimantée, et assez constant pour que ce courant puisse conserver la même intensité pendant la durée des expériences. Une pile de Daniell ou de Grove, de deux ou plusieurs couples comme appareil électromoteur, des fils ou des lames métalliques et des solutions salines ou acides comme conducteurs, satisfont parfaitement aux conditions voulues.

La première loi que nous rencontrons quand nous étudions la propagation de l'électricité dans un conducteur, c'est la tendance qu'a le courant électrique à se distribuer ou plutôt à se

disséminer dans toute l'étendue de ce conducteur. Cette loi que j'ai établie pour les conducteurs solides en 1824, et pour les liquides en 1825, peut se démontrer facilement de plusieurs manières. Pour la démontrer dans les conducteurs solides, il suffit de prendre une lame de cuivre très-large, de 10 à 15 centimètres, par exemple, et longue de 30, terminée à ses extrémités par deux fils également de cuivre placés sur le prolongement de la ligne qui partage la lame en deux parties égales et destinés à la mettre dans le circuit voltaïque. On dispose cette lame verticalement dans la cage d'une balance de torsion dont le fil porte un conducteur astatique, et on la dispose de façon que ses différentes sections longitudinales soient successivement en face de la branche verticale de ce conducteur. On dirige le courant de façon qu'il aille en sens contraire dans la lame et dans le fil conducteur mobile, ce qui donne lieu à une répulsion; on trouve, en prenant la moyenne de plusieurs expériences, que les angles de torsion, nécessaires pour ramener le conducteur mobile jusqu'au contact avec le conducteur fixe, sont sensiblement les mêmes, quelle que soit la portion de ce dernier, qui agisse sur lui. Si le courant est dirigé de façon qu'il y ait attraction, on trouve que les angles de torsion, nécessaires pour détacher le conducteur mobile du fixe, sont les mêmes, quelle que soit la partie de ce dernier qu'on fasse agir sur l'autre. On place, pour mesurer leur force d'attraction et de répulsion mutuelle, les deux conducteurs à une distance presque imperceptible l'un de l'autre, afin d'être sûr que l'action n'est due qu'à la tranche même du conducteur fixe, qui est située vis-à-vis du conducteur mobile, l'action des autres tranches s'exerçant trop obliquement pour produire un effet appréciable. Il résulte de cette expérience que l'électricité dynamique paraît se distribuer d'une manière uniforme dans toute l'étendue d'une lame qui lui sert de conducteur, et donner lieu à autant de courants parallèles et d'égale intensité qu'on peut supposer de tranches infiniment minces dans la lame rectangulaire.

On arrive au même résultat en plaçant horizontalement dans la direction du méridien magnétique la lame de cuivre ou une surface de mercure à laquelle on peut donner une largeur même

de 20 à 25 centimètres, et en en rapprochant aussi près que possible une très-petite aiguille aimantée parfaitement horizontale et très-délicatement suspendue. La déviation que cette aiguille éprouve quand la surface conductrice au-dessus de laquelle elle est placée est mise dans le circuit est la même, quelle que soit la portion de cette surface qui agisse directement sur elle, pourvu que l'aiguille ne soit jamais assez près du bord pour que son extrémité se trouve en dehors de la surface.

Ainsi on est conduit à admettre que le courant électrique, en entrant dans un conducteur solide, se répartit dans toute l'étendue de ce conducteur par petits filets parallèles, tous d'égale intensité, d'où résulte nécessairement que moins cette étendue sera considérable plus le courant électrique sera condensé et plus, par conséquent, son intensité sera grande dans chaque tranche du conducteur, résultat que l'expérience confirme pleinement lorsqu'on fait usage d'une lame conductrice d'une épaisseur uniforme, mais plus large dans certaines parties de sa longueur que dans d'autres. Cette même condensation du courant se démontre par le pouvoir que possède la partie étroite de la lame conductrice d'attirer la limaille de fer, tandis que la partie large n'en attire pas la plus légère quantité. C'est, comme nous le verrons, à la même cause qu'est dû le développement de chaleur qui accompagne le passage du courant électrique dans les parties étroites d'un conducteur dont les portions larges ne changent pas sensiblement de température, quoiqu'elles soient traversées par le même courant pendant le même temps.

La loi que nous venons d'établir ne se vérifie d'une manière exacte que dans les conducteurs chez lesquels l'une des dimensions, la longueur, l'emporte sur les autres, ce qui constitue le cas de la propagation linéaire. Dans les autres cas, la loi est moins simple. M. Kirchoff, qui en a fait une étude particulière, est arrivé néanmoins à des résultats tout à fait conformes à la théorie qui explique la propagation de l'électricité [1].

L'électricité dynamique manifeste cette même tendance à se disséminer, dans un conducteur liquide susceptible d'être dé-

[1] Voyez la note finale A pour l'exposition des recherches de M. Kirchoff.

composé aussi bien que dans un conducteur solide ou liquide tel que le mercure. Voici comment je m'en étais assuré déjà en 1825. On prend un baquet de 60 à 70 centimètres de diamètre, par exemple, et de 8 à 10 de profondeur, on le remplit d'eau salée ou acidulée, et on plonge les deux pôles de la pile à une distance chacun de 6 à 8 centimètres du bord, de façon qu'ils soient situés sur le même diamètre. Il est bon d'employer comme électrodes deux sphères de platine de 1 centimètre de diamètre, par exemple, surmontées chacune d'une tige métallique entourée d'une couche isolante, qui sert à les fixer et à établir la communication avec les pôles de la pile. Puis on ajuste, à chacune des extrémités du fil d'un galvanomètre magnétique, une petite tige de platine, et, au moyen d'une pièce d'ivoire ou d'un corps isolant quelconque, on maintient ces deux tiges, qui sont de même diamètre et de même longueur, à une distance qui soit toujours la même, de 5 centimètres, par exemple. On plonge cette espèce de fourchette dans diverses parties du liquide traversé par le courant, en ayant soin que l'étendue de la partie immergée soit toujours la même. On perçoit de cette manière la portion du courant qui traversait la tranche liquide interceptée entre les deux pointes de platine du galvanomètre. On trouve qu'elle est la plus considérable sur la ligne droite qui joint les deux pôles de la pile et entre ces deux pôles; mais que, sur cette ligne même, elle augmente d'intensité à partir du milieu où elle est la plus faible jusque près des pôles où elle atteint son maximum. Toutefois on trouve des courants dans toutes les parties du liquide, même derrière les pôles, c'est-à-dire dans la portion comprise entre chaque pôle et le bord du baquet. La diffusion des courants est d'autant plus prononcée que le liquide est moins bon conducteur, en sorte qu'il semble que les courants décrivent d'un pôle à l'autre des courbes d'un contour plus ou moins grand. Il serait intéressant de déterminer exactement la forme de ces courbes en cherchant, au moyen des sondes en platine, tous les éléments de filets qui ont la même intensité, ce qui permettrait de trouver le polygone et, par conséquent, la courbe isodynamique, qui varierait probablement avec la conductibilité du liquide.

M. Matteucci, qui a publié en 1839 quelques recherches sur le même sujet, s'était servi également de la même méthode, mais en prenant pour sondes des lames au lieu de fils de platine; ses expériences avaient porté surtout sur l'influence qu'exercent l'étendue et la distance des lames immergées, sur l'intensité du courant qu'elles peuvent absorber, et il avait trouvé que, plus le liquide est conducteur, plus il faut accroître leur surface et leur distance mutuelle pour percevoir un courant de même force. Et si les surfaces immergées des lames sont égales, leur distance doit être, dans une solution saturée de sulfate de cuivre, vingt fois plus grande que dans l'eau distillée. Quand les deux pôles ne sont pas sur la ligne qui partage par le milieu la masse liquide, on trouve que le courant absorbé par les sondes à une égale distance de la ligne médiane, mais de deux côtés différents de cette ligne, est toujours plus fort du côté qui est le plus rapproché du bord du canal, c'est-à-dire dans la couche qui renferme le moins de liquide. Je dois ajouter que M. Matteucci faisait des expériences en se servant d'un double galvanomètre et de deux systèmes de sonde parfaitement semblables et disposés de façon que le courant perçu par l'un était dirigé en sens contraire du courant perçu par l'autre, d'où résultait que, lorsque les deux courants perçus étaient parfaitement égaux, l'aiguille du galvanomètre restait en repos, et que le sens de sa déviation, quand il y en avait une, indiquait lequel des deux courants était le plus intense.

La seconde loi à laquelle est soumise la propagation de l'électricité dans un conducteur, c'est que deux ou plusieurs courants électriques peuvent se propager dans le même conducteur sans se modifier mutuellement, et d'une manière, par conséquent, tout à fait indépendante les uns des autres. M. Marianini a constaté cette propriété en faisant passer à travers un liquide placé dans un vase cubique deux courants disposés de façon que les filets dont ils se composent se croisent à l'angle droit, sans qu'il en résulte de variation dans l'intensité de chacun d'eux, intensité qui reste la même, qu'ils traversent chacun séparément ou tous deux ensemble la masse liquide conductrice. Un troisième courant peut encore être transmis à travers le même liquide

qui transmet déjà les deux autres et dans une direction qui leur est perpendiculaire, et cette transmission s'opère de la même manière que si ce liquide n'était traversé par aucun courant. Cette indépendance dans la propagation des courants a été encore établie en faisant passer deux et même trois courants à travers une colonne liquide dans des directions plus ou moins obliques les unes aux autres, et même en les transmettant à travers le fil d'un même galvanomètre sur lequel l'effet observé est toujours la somme ou la différence des effets individuels des courants partiels.

Ces faits semblent établir au premier abord une grande analogie entre l'électricité dynamique et la lumière dont les rayons peuvent tous se croiser dans le même petit trou sans éprouver la moindre altération et en conservant chacun leur propriété et leur caractère propre. Cependant l'analogie est plus apparente que réelle, car, comme nous l'avons remarqué dans le paragraphe précédent, la propagation de l'électricité ne peut être assimilée à un rayonnement, et elle n'en possède en effet aucune des propriétés, n'ayant pas une direction rectiligne à elle, n'étant susceptible d'éprouver ni réflexion, ni réfraction, ni polarisation.

Une troisième loi, qui semble au premier abord également favorable à l'analogie que nous venons de repousser, est la diminution d'intensité qu'éprouve l'électricité dans sa propagation à travers une masse liquide quand elle rencontre sur sa route des lames ou diaphragmes métalliques interposés dans le liquide. Ce phénomène, que j'ai signalé en 1825, se démontre facilement en séparant par des lames métalliques, en deux ou plusieurs compartiments distincts, une masse liquide conductrice placée dans un vase rectangulaire de 20 à 30 centimètres de longueur, aux deux extrémités duquel on plonge les pôles d'une pile. Un galvanomètre placé dans le circuit du courant transmis, indique, par l'amplitude de ses déviations, que ce courant éprouve une diminution d'intensité sensible par l'interposition d'un ou de plusieurs diaphragmes métalliques, lors même que le diaphragme est meilleur conducteur que la couche liquide qu'il remplace. Mais cette diminution est proportion-

nellement d'autant moindre pour un même diaphragme que le nombre des diaphragmes déjà interposés est plus grand et que le nombre des couples dont se compose la pile dont on fait usage est plus considérable. Ainsi un courant qui, par l'interposition de diaphragmes, n'est plus que de 75°, se trouve réduit à 73° seulement par l'interposition d'un troisième, tandis qu'un courant d'une intensité initiale de 75° est réduit à 67° par l'interposition d'un seul diaphragme. M. Marianini et d'autres physiciens, qui ont fait un grand nombre d'expériences sur ce sujet, ont tous confirmé mes conclusions. Cette influence des diaphragmes est également accusée par les voltamètres calorifique et chimique, aussi bien que par le galvanomètre magnétique. Ainsi un courant qui, transmis dans l'acide nitrique, accuse 38° au galvanomètre calorifique placé dans son circuit, n'en accuse plus que 30 quand un diaphragme de platine partage en deux compartiments la colonne d'acide nitrique, et 0° quand au lieu d'un seul il y a deux diaphragmes. Le premier diaphragme, qui réduit l'effet calorique à 1/13e de ce qu'il était primitivement, ne réduit le chimique qu'à 1/5e. En effet, avec le voltamètre chimique mis dans le circuit du courant à la place du calorifique, on trouve qu'il faut 5′ pour le dégagement d'une certaine quantité de gaz, quand il n'y a pas de diaphragme, tandis qu'il faut 25′ s'il y a un diaphragme.

On sait que la lumière et le calorique rayonnant éprouvent une diminution d'intensité qui est soumise aux mêmes lois, quand on interpose sur leur route un ou plusieurs diaphragmes qui sont plus ou moins susceptibles de les transmettre sous leur forme rayonnante; c'est ce qui avait conduit à l'analogie que nous avons rappelée il y a un instant. Toutefois ici encore l'analogie est plus apparente que réelle, car il est facile de s'assurer que le phénomène des diaphragmes n'est, quand il s'agit de l'électricité, qu'un phénomène de conductibilité. J'avais déjà remarqué en 1825 que, dès que le diaphragme métallique n'empêche pas complétement les deux portions du liquide qu'il sépare de communiquer entre elles, le courant se dévie en grande partie de sa route plutôt que de traverser le diaphragme. M. Matteucci a obtenu un résultat plus significatif en plaçant

dans un grand baquet rempli d'un liquide conducteur une boîte large de 2 centimètres et longue de 10, fermée à ses deux extrémités par deux lames de platine, tandis que ses deux côtés les plus longs sont en bois. Après l'avoir remplie du même liquide conducteur et au même niveau, il la place de façon que ses deux côtés de platine regardent les deux pôles de la pile plongés dans le grand baquet. L'un des deux systèmes de sondes est plongé dans la boîte, l'autre en dehors; mais tous deux sont placés symétriquement par rapport à la ligne qui joint les deux pôles. Quand la déviation du galvanomètre, qui est en faveur du système extérieur, est devenue constante, on enlève le système intérieur, ce qui ne change rien à la déviation; preuve qu'il n'y avait pas de courant transmis dans le liquide intérieur de la boîte et que le courant, au lieu de traverser les deux lames, s'est replié sur les flancs de manière à ne se propager qu'à travers la portion continue du liquide.

Il y a donc, indépendamment de la résistance propre qu'oppose un liquide et un solide à la transmission d'un courant électrique, une résistance particulière due au seul fait du passage d'un courant d'un solide dans un liquide ou d'un liquide dans un solide; c'est cette résistance que nous appellerons *résistance au passage*. Elle a toujours lieu dès qu'un liquide est traversé par un courant électrique, puisque pour mettre ce liquide dans le circuit il faut nécessairement employer des conducteurs solides appelés électrodes. Cette résistance au passage ne paraît pas, ainsi que plusieurs physiciens l'ont cru, être l'effet d'une propriété particulière tenant à la nature même du courant électrique, comme c'est le cas lorsqu'il s'agit de l'action des écrans sur la lumière et sur le calorique rayonnant. Elle est plutôt le résultat des phénomènes électro-chimiques qui, en vertu de l'action décomposante du courant, se passent nécessairement sur les surfaces des conducteurs solides qui sont en contact avec les liquides dans lesquels ils transmettent ce courant. Ces phénomènes assez complexes que nous étudierons plus loin doivent dépendre de la nature chimique des conducteurs liquides et solides en contact et des circonstances diverses qui peuvent modifier leur action mutuelle. Et en effet j'avais déjà remarqué, en 1825,

que la résistance au passage est d'autant moindre que le liquide exerce une action chimique plus forte sur le conducteur solide, et j'avais observé plus tard que l'élévation de la température des électrodes, plus particulièrement de l'électrode négatif, la diminue également. J'avais même réussi à l'annuler complètement en me servant de courants dirigés alternativement en sens contraire, tels que ceux qu'on obtient avec une machine magnéto-électrique ou simplement en plaçant un commutateur, soit rhéotrope, dans le circuit d'un courant voltaïque ordinaire. Dans ce cas, en effet, les courants qui se succèdent alternativement produisent, sur les surfaces solides, des effets chimiques alternativement contraires et, par conséquent, qui se neutralisent; et alors, en prenant certaines précautions, telles que d'employer des courants passablement énergiques et de les faire succéder très-rapidement les uns aux autres, on parvient, comme nous venons de le dire, à annuler la résistance au passage. Nous reviendrons, dans le chapitre où nous nous occuperons de la décomposition électro-chimique des corps, sur cette classe de phénomènes qui en dépendent immédiatement.

Une quatrième loi qui régit la propagation de l'électricité, c'est que toutes les parties successives d'un circuit fermé, y compris l'appareil lui-même qui produit le courant électrique, sont parcourues dans le même temps par la même quantité d'électricité, quelle que soit la diversité de leur nature, de leur forme et de leur étendue; circonstances qui n'influent que sur la quantité absolue d'électricité qui circule et non sur son intensité relative dans les différentes parties du circuit. Ainsi, si dans le même circuit on a d'abord la pile, puis un fil de métal partant de l'un des pôles et aboutissant dans un liquide et deux ou plusieurs fils parallèles partant de ce liquide pour aboutir à l'autre pôle, la quantité d'électricité qui, sous forme de courant, traverse la pile elle-même, le premier fil métallique, le liquide et les deux ou plusieurs fils parallèles, est exactement la même. Il est clair que si ce dernier système de conducteur se compose de deux fils et que ces deux fils soient parfaitement semblables en tout point, la quantité d'électricité qui circule dans chacun d'eux est la moitié de ce qu'elle est dans le pre-

mier fil ; elle serait le tiers s'il y avait trois fils, et ainsi de suite ; mais dans les deux ou dans les trois réunis, elle est en totalité la même que dans le premier fil. Cette loi importante avait été déjà entrevue par Ampère, quand il avait montré que l'action exercée sur une aiguille aimantée est la même, quelle que soit la portion d'un circuit voltaïque, la pile comprise, qui agisse sur elle. M. Becquerel l'avait constatée d'une manière plus précise, en soudant à différents points, puis à distance égale d'un conducteur métallique qui réunit les deux pôles d'une pile, des fils métalliques qu'il mettait en communication avec les extrémités d'un galvanomètre, et en s'assurant que les courants amenés par ces fils étaient égaux en force, deux à deux, quand les portions du conducteur principal interceptées par les deux systèmes de fils soudés étaient elles-mêmes égales.

J'ai moi-même énoncé dans plusieurs occasions le même principe, en l'appuyant sur des faits que j'exposerai dans le chapitre de la cinquième partie, où je traiterai de la théorie de la pile voltaïque. Enfin Pouillet et Fechner ont démontré cette loi d'une manière directe. M. Pouillet plaçait tous les éléments successifs d'une pile thermo-électrique dans le méridien magnétique, ainsi que le conducteur destiné à fermer le circuit, et il s'assurait qu'une aiguille aimantée, placée au-dessus d'une partie quelconque du circuit total, éprouvait toujours la même déviation, quelle que fût cette partie. M. Fechner a obtenu de son côté un résultat semblable, en faisant osciller une aiguille aimantée au-dessus des différentes portions solides d'un circuit voltaïque, placées perpendiculairement à la direction de l'aiguille, et en constatant que ses oscillations s'exécutent dans le même temps, ce qui prouve l'égalité d'intensité du courant dans ces différentes parties. Toutefois il n'a pas vérifié directement par l'expérience que cette égalité s'étend aux conducteurs liquides de la pile, ce qui est cependant généralement admis.

La loi qui nous occupe, admise implicitement par Ohm dans sa théorie de la pile, a été prouvée moins par des expériences directes que par les conséquences qu'on en a tirées et qui ont toujours été vérifiées. Il me paraît cependant nécessaire d'en

donner une démonstration expérimentale positive. Voici la description de l'appareil que j'ai construit dans ce but (fig. 182).

Fig. 182.

Des bouts de tube, tous de même diamètre et parfaitement calibrés, sont unis les uns aux autres par des cylindres métalliques, soit pleins, soit creux, de même diamètre extérieur que les tubes, et présentant une face zinc à l'une de leurs extrémités et une face cuivre à l'autre. On remplit les tubes de verre de différents liquides conducteurs; on ferme le circuit au moyen d'un tube de verre toujours de même diamètre que les autres, rempli de mercure. On a ainsi un circuit composé de couples voltaïques, de liquides, de conducteurs métalliques vides et pleins, d'une colonne de mercure; en un mot de parties toutes conductrices et quelques-unes seulement actives, et dont la section transversale est la même. Si l'on dispose successivement les différentes parties de circuit de manière qu'elles soient parallèles au méridien magnétique, une aiguille aimantée délicatement suspendue au-dessus de chacune d'elles exécute le même nombre d'oscillations; l'aiguille n'éprouve aucune déviation quand on la place exactement entre deux parties opposées de ce circuit, parallèles l'une et l'autre au méridien. Ces résultats prouvent que la somme des forces électriques qui traversent dans le même temps chacune des sections transversales de ce circuit est bien la même. Il suffit de remplacer le liquide de l'un des compartiments par un liquide moins ou plus conducteur, pour diminuer ou augmenter l'intensité absolue du courant, non pas seulement dans la partie du circuit qui est modifiée, mais dans tout le circuit également, de manière que sa force demeure toujours la même dans toutes ses portions dans le même instant.

J'ai supposé, dans l'expérience qui précède, que le circuit, quoique hétérogène, est cependant tel que toutes ses sections transversales sont égales. La loi n'en subsiste pas moins quand elles sont inégales. Pour le prouver, il suffit de remplacer le mercure qui est dans le tube par un fil métallique d'un diamètre quelconque, ou homogène, ou composé de bouts de différents métaux soudés les uns à la suite des autres, en ayant soin de mettre le fil dans l'axe du même tube où était le mercure, de manière aussi qu'il ferme le circuit. Si l'on place l'aiguille aimantée au-dessus des différentes parties de ce fil, on la voit exécuter le même nombre d'oscillations que lorsqu'elle est placée au-dessus des différents conducteurs liquides ou solides qui sont dans le reste du circuit. Seulement il faut avoir soin, pour annuler les différences qu. pourraient provenir de la diversité des diamètres des différentes parties du circuit, de placer l'aiguille de manière qu'elle n'en soit pas trop rapprochée, mais toujours de façon que partout elle soit à la même distance de l'axe des conducteurs qui agissent sur elle.

Il résulte de cette quatrième loi que l'intensité absolue de l'électricité qui traverse, sous forme de courant, un circuit fermé, ne dépend que de deux circonstances, la force ou les forces qui produisent l'électricité, et que nous pourrons appeler *forces électromotrices*, et les résistances à la conductibilité que présente tout l'ensemble du circuit. Ce second élément, auquel on n'avait jamais eu égard, avait déjà été indiqué par moi, soit en 1825, dans le mémoire auquel j'ai fait allusion plus haut, soit dans les recherches postérieures que j'ai publiées en 1828 et plus tard. M. Ohm, dans un ouvrage important qui a paru en 1827, est arrivé, à la suite de spéculations purement théoriques, à admettre que la force du courant, dans un circuit fermé, est directement proportionnelle à la somme des forces électromotrices qui sont en activité dans le circuit, et que nous appellerons E, et inversement proportionnelle à la résistance totale ou à la somme des résistances de toutes les parties du circuit, que nous désignerons par R; en d'autres mots, que l'intensité du courant est égale à la somme des forces électro-

motrices, divisée par la somme des résistances : $I = \frac{E}{R}$. L'expérience a confirmé l'exactitude de cette formule dans des limites suffisantes pour l'usage que nous sommes appelés à en faire dans ce chapitre. Nous y reviendrons plus tard, quand nous aborderons la théorie de la pile.

Une cinquième loi, qui découle immédiatement de la précédente, est que, si on augmente ou l'on diminue la résistance d'une partie quelconque d'un circuit, l'intensité totale du courant diminue ou augmente, toutes les autres circonstances restant les mêmes, dans un rapport qui est le même que celui qui existe entre la résistance ajoutée ou retranchée et la résistance totale nouvelle du circuit tout entier.

Si dans la formule $I = \frac{E}{R}$, R devient $R + r$ ou $R - r$, I devient $\frac{E}{R+r}$ ou $\frac{E}{R-r}$; appelant I' l'intensité dans le premier cas et I'' dans le second, on a :

$$I : I' : I'' = \frac{E}{R} : \frac{E}{R+r} : \frac{E}{R-r} = \frac{1}{R} : \frac{1}{R+r} : \frac{1}{R-r}$$

d'où l'on déduit :

$$I - I' : I = r : R + r \text{ et } I'' - I : I = r : R - r,$$

c'est-à-dire que la diminution d'intensité est à l'intensité primitive comme la résistance r ajoutée est à la résistance totale nouvelle $R + r$ et l'augmentation $I'' - I$ est à l'intensité primitive comme la résistance r supprimée est à la résistance nouvelle totale $R - r$.

Fechner a vérifié par l'expérience, au moyen des oscillations qu'exécute une aiguille sous l'action du courant, l'exactitude de la loi que nous venons d'énoncer. Il en a conclu qu'une pile dont la force électromotrice serait représentée par 1, ayant ses pôles réunis par un conducteur dont la résistance serait également 1, et dans laquelle 9 représenterait la résistance de la pile elle-même, aurait une force représentée par $\frac{1}{9+1} = \frac{1}{10}$. En doublant la résistance du conducteur, il est évident qu'on ne rend pas moitié moindre la force de la pile, qui devient

$\frac{1}{9+1+1}=\frac{1}{11}$ au lieu de $\frac{1}{10}$ qu'elle était. Si c'est la résistance du conducteur interposé entre les pôles qui est 9 fois celle de la pile, alors en doublant cette résistance, la force de la pile qui était égale à $\frac{1}{1+9}=\frac{1}{10}$ devient $\frac{1}{1+18}=\frac{1}{19}$. Il est facile de voir d'après cela que plus la résistance du conducteur interposé est grande, moins est grande l'influence de la résistance des autres parties du circuit. M. Pouillet est arrivé à la même vérification en employant le galvanomètre à tangente, au moyen des expériences suivantes. Il prend un couple à force constante de Daniell, dont il fait parvenir le courant à ce galvanomètre à tangente, au moyen de deux tiges de cuivre, puis il fait avec un fil de cuivre recouvert de soie des séries de longueurs différentes, de 5, de 10, de 40, 70 et 100 mètres, qu'il enroule en couronne et en les enveloppant d'un ruban, de manière que les deux extrémités recourbées en crochet puissent aisément plonger dans des godets de mercure destinés à établir la communication. On procède ensuite de la manière suivante : on fait passer directement le courant dans le galvanomètre à tangente et l'on observe la déviation; puis l'on introduit successivement dans le circuit tous les fils de la série, en notant soigneusement les déviations correspondantes, et en se rappelant que les intensités des courants successifs sont proportionnelles aux tangentes des angles de déviation obtenus. La résistance du circuit total (qui est composée des résistances du couple, du fil du galvanomètre, et des conducteurs divers destinés à établir la communication), étant R avant que les fils aient été introduits, cette résistance devient successivement, à mesure qu'on introduit les fils de différentes longueurs, $R+5^m$, $R+10^m$, etc. Il en résulte le tableau suivant :

Résistances.	Déviations observées.	Tangeotes des déviations.
R	62°, 00	1, 880
R + 5m	40°, 20	0, 849
R + 10m	28°, 30	0, 543
R + 40m	9°, 45	0, 172
R + 70m	6°, 00	0, 105
R + 100m	4°, 15	0, 074

En comparant la première observation avec chacune des suivantes, on tire pour R les valeurs $4^m,11$; $4^m,06$; $4^m,01$; $4^m,14$; $4^m,09$, dont la moyenne est $4^m,08$. On se sert pour cela de la formule $I - I' : I = r : R + r$ en mettant à la place de I la valeur 1,880, à la place de I' les valeurs successives 0,849; 0,543, etc.; et, à la place de r, les valeurs correspondantes 5^m, 10^m, 40^m, etc.

Ce résultat montre qu'à de très-légères différences près, qu'on ne peut attribuer qu'à de petites erreurs d'expérience, on obtient la même valeur pour R, quelle que soit celle des observations subséquentes qu'on compare à la première, preuve encore qu'on a bien, $I - I' : I = r : R + r$; car, en remplaçant I par le nombre 1,880, on obtient pour R la même valeur, quand on met successivement pour r, 5^m, 10^m, 40^m, 70^m et 100^m; et pour I' les valeurs correspondantes 0,849; 0,543; 0,172; 0,105 et 0,074. Ainsi, la loi qui nous a donné la formule est bien juste, puisqu'elle conduit, dans tous les cas possibles, à une même valeur pour une quantité qui est en effet nécessairement la même.

La valeur de $R = 4^m,08$, indique que la résistance de tout le circuit primitif, non compris, par conséquent, les fils de cuivre qu'on y ajoute, équivaut à la résistance qu'exerce une longueur de ce même fil de cuivre de $4^m,08$; c'est ce qu'on appelle *longueur réduite*. Ainsi, la longueur réduite d'un circuit est la longueur d'un fil métallique d'une nature et d'une épaisseur données, dont la résistance est égale à la somme des résistances de ce circuit. C'est une manière très-commode d'exprimer la résistance à la conductibilité que présente tout ou partie d'un circuit, que de la ramener à celle qu'exercerait une certaine longueur d'un fil métallique d'une nature et d'un diamètre donnés. Nous verrons dans l'instant le parti qu'on a tiré de ce principe pour la construction d'un appareil très-précieux pour la mesure des courants électriques.

Mais auparavant, nous avons encore à établir deux lois importantes qui découlent implicitement des précédentes, mais qu'on peut démontrer directement. Ces lois sont, que la résistance qu'offre au courant un conducteur quelconque est proportion-

nelle à sa longueur et inverse de sa section. Nous avons admis implicitement la première de ces deux lois pour un fil métallique, quand nous avons représenté par leurs longueurs respectives les résistances ajoutées par l'interposition de chacun des fils de 5^m, de 10^m, de 40^m, de 70^m et de 100^m, ayant tous le même diamètre et étant de la même nature. Or, le résultat auquel nous a conduit cette hypothèse appliquée à plusieurs expériences différentes ayant toujours été, comme nous l'avons vu, d'accord avec les faits, nous pouvons la regarder comme une vérité. Cependant notre formule reposait sur une autre hypothèse qu'elle était également destinée à vérifier, savoir l'existence de la cinquième loi relative au rapport entre les variations d'intensité du courant et les variations de la résistance. L'accord de cette formule unique avec les faits suffit-il pour démontrer en même temps, et la loi qui a servi à l'établir, et celle qu'on a admise dans l'interprétation des expériences? On pourrait en douter, s'il n'y avait qu'une seule expérience, mais comme il y en a un grand nombre et que toutes conduisent au même résultat, il faut en conclure que la supposition qu'on a faite de la proportionnalité entre la longueur d'un conducteur et la résistance qu'il offre au courant est bien exacte.

La seconde loi relative à la section peut être vérifiée par une série d'expériences semblables à celles qui nous ont servi à obtenir la loi relative aux longueurs, en mettant successivement dans le circuit des fils de même nature et de même longueur, mais de diamètres différents, et en déterminant dans chaque cas la valeur de la résistance totale ou bien celle de la diminution ou de l'augmentation que cette résistance éprouve par la substitution des fils de diamètres différents les uns des autres.

Davy, Becquerel, Harris, Cumming, et en général tous les physiciens qui se sont occupés de la conductibilité des corps pour l'électricité, ont commencé par prouver que le pouvoir conducteur d'un fil métallique est en raison inverse de la longueur et en raison directe de la section du fil, loi qui est exactement la même que celle que nous venons d'énoncer. Nous ferons connaître les divers procédés de ces physiciens dans la

partie de ce chapitre consacrée à la détermination du pouvoir conducteur des différents corps et à l'étude des causes qui peuvent le modifier.

Il y a entre les deux lois que nous venons d'énoncer une différence importante : la première, celle relative aux longueurs, a besoin d'être prouvée directement par l'expérience; la seconde, celle des sections, est une conséquence de la distribution uniforme de l'électricité en mouvement dans toutes les parties d'un conducteur homogène. En effet, cette distribution qui nous montre que l'électricité dynamique ne se porte pas, comme la statique, à la surface des corps, mais qu'elle se répand dans tout leur intérieur, nous conduit à reconnaître, puisqu'elle est uniforme dans une masse conductrice homogène, que la conductibilité électrique doit croître, et, par conséquent, la résistance diminuer avec le nombre des points, soit avec la grandeur ou l'étendue de la section faite dans le conducteur. Il faut seulement que le conducteur soit nécessairement homogène dans le sens transversal, car, s'il ne l'était pas, la distribution de l'électricité ne serait plus uniforme, et la loi ne pourrait plus évidemment subsister.

La loi des longueurs et des sections s'applique aussi bien aux conducteurs liquides qu'aux solides. Elle est seulement plus difficile à démontrer dans ce dernier cas que dans le premier, parce que, pour mettre le liquide dans le circuit, il faut employer des électrodes de métal, et qu'il y a, comme nous l'avons vu, par le fait du passage du courant du solide dans le liquide et du liquide dans le solide, une diminution d'intensité complétement indépendante de la conductibilité propre du liquide lui-même. Toutefois, on peut se mettre à l'abri de l'effet de cet élément en se servant d'une colonne liquide qu'on allonge ou qu'on raccourcit sans rien changer aux électrodes. Un tube, fermé à une de ses extrémités par un disque de platine qui fait l'office de l'un des électrodes, dans lequel se meut un piston dont la base en platine sert de second électrode, remplit bien le but, puisqu'une fois le tube plein de liquide, on peut, en faisant marcher le piston, allonger ou raccourcir la portion de la colonne liquide qui est mise dans le circuit. Nous décrirons plus en dé-

tail cet appareil, quand nous nous occuperons de la conductibilité des liquides.

Fechner, dans son grand travail dont nous avons déjà parlé, avait déterminé la loi qui lie la résistance du conducteur avec sa longueur, aussi bien pour le conducteur liquide que pour le solide. Il avait trouvé, toujours par la méthode des oscillations, que l'addition de longueurs égales de fils de métal accroît la résistance de quantités égales, d'où il avait conclu que la résistance des fils est proportionnelle à leur longueur. Il était ensuite parvenu à la même loi pour le conducteur liquide, en éloignant successivement d'une quantité, toujours la même, les plaques des couples de la pile; et il avait trouvé ainsi que la résistance des liquides est proportionnelle à l'épaisseur de la couche liquide que le courant doit traverser. Cette loi est également vraie, que la section du liquide soit égale à la surface des plaques des électrodes ou qu'elle soit plus grande. Quant à la loi qui lie la résistance du liquide avec la grandeur de sa section, Fechner a trouvé qu'elle ne se vérifie qu'autant que la surface des électrodes est égale à celle de la section. Ainsi, si l'on place verticalement dans une auge deux plaques métalliques servant d'électrodes, et qu'on verse dans l'auge une proportion croissante d'un liquide conducteur, la résistance totale diminue de quantités correspondantes à la quantité de liquide qu'on ajoute. Mais, une fois que l'étendue de la section du liquide a dépassé d'un certain degré la grandeur de la surface métallique immergée, une augmentation dans la section du liquide ne diminue plus sensiblement la résistance; c'est au moins ce que croit Fechner. Nous verrons plus loin, à l'occasion de la conductibilité du globe terrestre, que cette opinion est juste, mais que la limite à laquelle une augmentation de la section n'exerce plus d'influence sur la résistance ou sur la conductibilité d'un corps dépend d'un grand nombre de circonstances, et en particulier de l'intensité même de l'électricité en mouvement.

Enfin, une dernière loi importante, conséquence également des précédentes et confirmée aussi par l'expérience, est celle qui régit le partage du courant électrique entre deux conducteurs parallèles placés dans le circuit. S'ils sont de même nature, de

même diamètre et de même longueur, conditions que réalisent deux fils métalliques semblables, il est évident que le courant se partage également entre eux. Mais s'ils sont de longueurs différentes, tout en étant de même nature et de même diamètre, que la longueur de l'un soit m et celle de l'autre n, la proportion du courant qui traverse chacun d'eux est inverse de sa longueur, et l'intensité du courant total est la même que si, au lieu de deux fils d'une longueur m et n, on plaçait dans le circuit un seul fil d'une longueur $\frac{mn}{m+n}$ [1]. Généralement, si a et b représentent les résistances respectives de deux conducteurs quelconques interposés parallèlement dans le circuit, la résistance complète des deux conducteurs est la même que celle d'un conducteur unique dont la résistance aurait pour expression $\frac{ab}{a+b}$. Les deux conducteurs peuvent différer par leur nature, leur longueur et leur section, ou par ces trois circonstances réunies. Seulement, il faut qu'ils soient tous deux métalliques ou tous les deux liquides; car, si l'un est métallique et l'autre liquide, la loi ne se vérifie pas, à cause du nouvel élément qui naît de la résistance au passage. Voici une expérience de M. Poggendorff, qui met en évidence cette exception importante à la loi. Il a inséré dans l'axe d'un tube de verre vertical un fil de platine de 80 pouces 5 lignes de longueur, dont la résistance était la même que celle de 86 pouces d'un fil d'argentane; il a rempli ce tube d'acide sulfurique étendu contenant 10 pour 100 d'acide concentré, et il s'est assuré que la résistance de cette colonne liquide, mise seule dans le circuit, était la même que celle de 10 pouces du fil d'argentane, et par conséquent au moins huit fois et demi moindre que celle du fil de platine. Au

[1] En effet, d'après la loi des longueurs, en appelant i' et i'' les intensités des deux courants partiels, qui passent respectivement par les fils de la longueur m et de la longueur n, $i'+i''$ étant égal à i, intensité du courant total, on a :

$$i' : i'' = n : m \qquad i'+i'' \text{ ou } i : i' = n+m : n$$

$$\text{D'où } \frac{i'}{i'+i''} = \frac{n}{n+m}$$

On a aussi : $i'+i''$ ou $i : i' = m : x$, x étant la longueur cherchée;

$$\text{D'où } x = \frac{i'}{i+i''} \times m = \frac{mn}{m+n}$$

moyen d'un galvanomètre très-sensible, susceptible d'accuser une différence de 1/8 de ligne dans la longueur du fil de platine ou de la colonne liquide, il a constaté que la résistance du fil de platine déterminée, quand il est seul dans le tube, n'est point diminuée quand ce tube est rempli du liquide conducteur, preuve qu'aucune partie du courant ne passe à travers le liquide et que par conséquent, quoique celui-ci soit beaucoup meilleur conducteur que le fil métallique, il ne se fait aucun partage du courant entre lui et le fil, comme cela aurait lieu entre deux métaux et même entre deux conducteurs liquides. On peut également s'assurer qu'il n'y a aucune diffusion du courant du métal dans le liquide en disposant le fil de platine à travers un vase horizontal rempli d'une solution acide et en plongeant dans la solution, très-près du fil, deux lames de platine en communication avec les extrémités d'un galvanomètre très-sensible; si alors on fait passer un courant à travers le fil de platine, on n'obtient pas le plus léger effet au galvanomètre.

La dernière loi que nous venons d'énoncer nous mène à dire quelques mots sur les courants dérivés, dont nous aurons souvent à nous occuper, et dont la théorie est une conséquence de cette loi. Quand dans un circuit fermé on réunit deux points de ce circuit par un conducteur additionnel, on opère ce qu'on appelle une *dérivation* du courant. Les deux points du circuit d'où part et où aboutit le nouveau conducteur se nomment les *points de dérivation*, et l'intervalle qui les sépare, la *distance de dérivation;* le conducteur ou fil ajouté est le *fil de dérivation*. On nomme la portion du courant qui passe par ce fil, *courant dérivé;* celle qui continue à passer par la partie du circuit compris entre les deux points de dérivation, *courant partiel;* enfin on désigne sous le nom de *courant primitif* le courant tel qu'il existait avant qu'on eût opéré la dérivation, et de *courant principal* la totalité du nouveau courant, nécessairement plus fort, qui traverse tout l'ensemble du circuit quand on a ajouté le fil de *dérivation*. Il est facile, d'après les principes que nous avons exposés et les lois que nous avons trouvées, de déterminer les intensités du courant principal, du courant dérivé et du courant partiel, en connaissant celle du

courant primitif, la longueur réduite du circuit primitif, la distance des points de dérivation et la conductibilité ou la résistance du fil de dérivation. Nous renvoyons à la note finale B la détermination de ces intensités, ainsi que la description des procédés au moyen desquels divers physiciens, et Wheatstone en particulier, ont appliqué les lois qui régissent les propriétés des courants dérivés à la construction d'appareils et d'instruments propres à déterminer avec une grande précision, dans une foule de cas, l'intensité des forces électriques [1]. Nous nous bornerons à décrire ici celui des appareils de Wheatstone qui est le plus fréquemment employé; c'est le *rhéostat*. Il est fondé sur une des lois que nous avons énoncées plus haut, savoir, celle que la résistance à la conductibilité d'un fil métallique homogène est proportionnelle à sa longueur.

Le but que l'appareil de Wheatstone tend à remplir consiste à introduire dans le circuit du courant dont on veut mesurer l'intensité un fil métallique dont l'interposition produit une résistance connue, puis de faire varier la longueur de ce fil d'une quantité qu'on peut apprécier avec une grande exactitude sans rien changer au reste du circuit, de manière à produire une résistance qui amène le courant à avoir une intensité déterminée toujours la même. Cette opération, exécutée sur différents courants, donne immédiatement le rapport qui existe entre leurs intensités relatives. Le grand avantage qu'elle présente, c'est de permettre de toujours ramener au même degré les indications du galvanomètre mis dans le circuit, en faisant varier la résistance, ce qui fait qu'on n'a pas besoin de connaître les rapports, qu'on ne peut déterminer que difficilement et jamais exactement, qui existent entre la déviation de l'aiguille du galvanomètre et l'intensité du courant correspondant. On n'a besoin d'admettre que le principe évident de lui-même, que toutes les fois qu'avec le même galvanomètre on obtient la même déviation, cela indique que l'intensité des courants qui produisent cette déviation est la même.

Jacobi et Poggendorff avaient également imaginé un appa-

[1] Voyez la note finale B.

reil analogue à celui de Wheatstone, fondé sur le même principe et remplissant le même but. Dans celui de Poggendorff, le fil, dont on fait varier la longueur, est en argentane; dans celui de Jacobi, nommé par son inventeur *volta-agomètre,* il est en platine; dans celui de Wheatstone, le fil est en cuivre ou en laiton. Ces appareils diffèrent entre eux quant aux détails de leur construction; nous nous bornerons à décrire celui de Wheatstone, dont l'emploi nous paraît plus commode et est plus répandu. L'auteur en a construit deux sur le même principe, l'un destiné aux circuits dans lesquels la résistance est considérable, l'autre à ceux dans lesquels elle est faible.

Le premier instrument (fig. 183) est en A; *g* est un cylindre

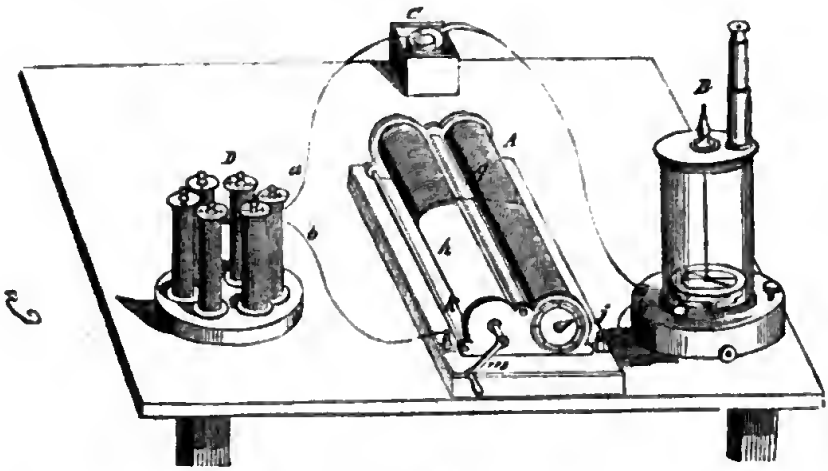


Fig. 183.

de bois, *h* un cylindre de laiton, tous deux du même diamètre et ayant leurs axes parallèles. Sur le cylindre de bois est entaillée une rainure en hélice, et à l'une de ses extrémités est fixé un anneau de cuivre, auquel est attaché l'un des bouts d'un long fil métallique d'un très-petit diamètre. Ce fil, lorsqu'il est enroulé autour du cylindre de bois, remplit toute la rainure, et est fixé par son autre bout à l'extrémité opposée du cylindre de cuivre. Deux ressorts *j* et *k* pressant, l'un contre l'anneau de cuivre du cylindre de bois, l'autre contre l'extrémité du cylindre de cuivre *h*, au moyen de deux vis de jonction, peuvent être mis en communication avec les fils métalliques du circuit.

a manivelle mobile *m* sert à faire tourner les cylindres sur leurs

axes. Lorsqu'elle est adaptée au cylindre *h* et tournée de gauche à droite, le fil métallique se déroule de dessus le cylindre de bois, et s'enroule sur le cylindre de cuivre; mais lorsqu'on l'adapte au cylindre *g* et qu'on la tourne de droite à gauche, le contraire a lieu. Les circonvolutions sur le cylindre de bois étant isolées et séparées l'une de l'autre par la rainure, le courant suit la longueur entière du fil enroulé sur ce cylindre, mais les circonvolutions sur le cylindre de cuivre n'étant pas isolées, le courant passe immédiatement du point du fil en contact avec le cylindre au ressort *k*. La partie efficace de la longueur du fil métallique se réduit donc à la portion variable enroulée sur le cylindre de bois. Dans l'instrument que M. Wheatstone emploie ordinairement, les cylindres ont 15 à 16 centimètres de longueur et 4 de diamètre; le filet de la vis est de 1/20 de millimètre; le fil, qui est de laiton, a 1/40 de millimètre de diamètre. Le fil est, comme on le voit, très-mince et très-mauvais conducteur, afin qu'on puisse ainsi introduire une plus grande résistance dans le circuit. Une échelle mesure le nombre des circonvolutions déroulées et divise les fractions de circonvolution, au moyen d'un index fixé à l'axe de l'un des cylindres qui parcourent les divisions d'un cercle gradué. Il en résulte qu'on peut connaître la longueur exacte de la portion de fil qu'on introduit dans le circuit, ainsi que la valeur des variations qu'on fait subir à cette longueur. La figure 3 montre la disposition de l'appareil quand il sert à une expérience. B est un galvanomètre très-sensible, à aiguille astatique, portant un microscope pour lire les divisions du cercle, ce qui facilite grandement les observations; C est un couple voltaïque dont on veut mesurer la force électromotrice; D sont des bobines de fils métalliques recouverts de soie dont on introduit un plus ou moins grand nombre dans le circuit pour augmenter la résistance. Nous verrons dans la cinquième partie, consacré à l'étude des sources de l'électricité, comment on peut facilement arriver, avec le rhéostat, à la détermination des forces électromotrices [1].

[1] M. Rumkorff construit actuellement à Paris des rhéostats dans lesquels le cylindre de bois est remplacé par un cylindre de verre à rainures, ce qui présente beaucoup plus de sécurité dans l'emploi de l'instrument.

Le rhéostat A, destiné aux circuits dans lesquels la résistance est comparativement faible, est (fig. 184) un cylindre de bois *a*

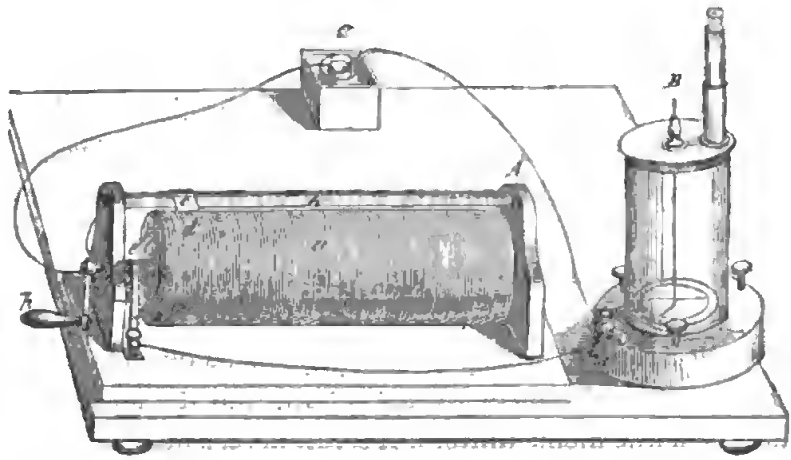


Fig. 184.

bien sec, sur la surface duquel une rainure est creusée en hélice; un gros fil de cuivre est enroulé autour du cylindre, occupant la rainure et formant comme le filet d'une vis. Immédiatement au-dessus du cylindre, et parallèlement à son axe, est placée une barre métallique triangulaire *b*, portant un curseur *c*; à ce curseur est adapté un ressort *d*, qui presse constamment contre les spires du fil de cuivre, cédant à toutes les petites inégalités. L'un des bouts de l'hélice métallique est attaché à un anneau de laiton *e*, contre lequel presse un ressort qui est en communication, au moyen d'une vis de jonction, avec l'une des extrémités du circuit; l'autre extrémité du circuit est retenue par une vis semblable, se trouvant en connexion métallique avec la barre triangulaire de métal. En tournant la manivelle *b*, on fait mouvoir le cylindre sur son axe dans l'une ou l'autre direction; et le curseur *c*, guidé par le fil de cuivre, glisse le long de la barre, avançant ou reculant suivant que le cylindre tourne à droite ou à gauche. Le curseur venant à se mettre en contact avec un point différent du fil de cuivre, une résistance différente est introduite dans le circuit, occasionnée par la seule portion du fil comprise entre le curseur et le bout qui est en

communication avec le ressort. Le cylindre de l'instrument construit par M. Wheatstone a 28 centimètres de longueur et 9 de diamètre; le fil est de cuivre, de 2 millimètres environ de diamètre; il fait 108 circonvolutions autour du cylindre. Les dimensions de l'instrument, ainsi que celles des fils métalliques, peuvent être modifiées selon les limites de la résistance variable qu'on désire introduire dans le circuit, et selon le degré d'exactitude avec lequel on tient à mesurer ces variations.

Nous ne quitterons pas ce sujet sans ajouter que M. Jacobi, qui a fait une étude approfondie des moyens de mesurer les courants électriques, a proposé aux physiciens de rapporter les instruments avec lesquels ils ont l'habitude de mesurer les résistances, à une même unité, qui serait la résistance d'un fil de cuivre de 1 mètre de longueur et de 1 millimètre de diamètre. Mais comme tous les cuivres ne sont pas identiques, il faudrait choisir arbitrairement un fil quelconque et le faire voyager d'un physicien à l'autre. C'est ce qu'a déjà essayé de réaliser M. Jacobi. Peut-être ce qui vaudrait le mieux, ce serait d'employer le mercure comme étalon de résistance pour la construction des rhéostats ou des agomètres, comme les appelle M. Jacobi. Le mercure en effet a le grand avantage de pouvoir, au moyen de la distillation, être amené à un état de grande pureté, et d'être, par conséquent, toujours identique à lui-même; il n'a pas l'inconvénient d'avoir, comme les fils métalliques, une structure moléculaire variable, puisqu'il est liquide. Il ne s'agirait plus, ce qui n'est pas difficile, que de lui donner des dimensions toujours les mêmes. Au reste, M. Jacobi a déjà lui-même construit un agomètre avec le mercure, et il paraît avoir réussi à mesurer les résistances au moyen de cet appareil, avec une précision qui permet de diminuer l'erreur probable jusqu'à la cent millième partie de la résistance totale.

§ 3. Conductibilité électrique des solides et des liquides.

Nous avons vu qu'il n'y a pas de conducteur parfait, mais que tous les corps présentent à la propagation de l'électricité une résistance plus ou moins grande. Nous avons regardé comme possédant ce que nous appelons la conductibilité électrique ceux qui permettent à l'électricité une propagation assez rapide pour qu'il en puisse résulter l'état dynamique, accusé par l'action sur l'aiguille aimantée. Ainsi, tandis que la résistance à la propagation de l'électricité serait une propriété générale des corps, la conductibilité, telle que nous l'entendons, n'appartiendrait qu'à un certain nombre d'entre eux. Ce n'est pas à dire que toutes les substances, même les plus isolantes, ne puissent transmettre plus ou moins l'électricité; mais il faut pour celles que nous appelons isolantes, telles que le verre, les résines, la gutta-percha, les huiles, l'air atmosphérique, une source électrique d'une très-grande intensité. Et même avec la source la plus énergique, comme la foudre, par exemple, ces substances ne transmettent point l'électricité sous la forme qui constitue ce que nous avons appelé l'état dynamique; mais elles la propagent, ou trop lentement pour agir sur l'aiguille aimantée, ou trop instantanément en se brisant elles-mêmes sous l'action de la décharge, pour qu'il puisse y avoir un courant proprement dit.

La recherche qui doit nous occuper dans ce moment n'a pour objet que les corps doués de la conductibilité électrique, telle que nous venons de la définir. Cette conductibilité qui, comme nous l'avons vu, n'est jamais absolue, varie, ainsi que nous l'avons établi, avec les dimensions des corps, mais de plus elle varie aussi avec leur nature et avec différentes circonstances physiques. Ce sont ces influences que nous voulons apprécier, et même mesurer, de manière à donner un tableau aussi exact que possible des degrés de conductibilité relative des diverses substances, soit solides, soit liquides, ainsi que des variations qu'amènent dans leurs pouvoirs conducteurs des changements

dans leur constitution physique et dans leur température en particulier.

La détermination de la conductibilité spécifique des différents corps n'est pas un problème facile à résoudre. Sa solution repose sur des principes assez délicats et exige des appareils doués à la fois d'une grande sensibilité et d'une extrême précision. Il faudrait, pour parvenir à cette solution, avoir une source constante d'électricité telle que la tension des deux électricité y fût constamment la même, et de plus avoir un moyen de mesurer exactement la quantité d'électricité qui circule à l'état dynamique, dans un temps donné, à travers un conducteur quelconque. Puis, pour établir une comparaison, on chercherait à obtenir la quantité d'électricité qui traverse dans l'unité de temps une section infiniment mince de chacun des corps, et on la diviserait par la surface de la section, ce qui donnerait la quantité d'électricité qui traverse dans l'unité de temps l'unité de surface.

Le principe de cette méthode est tout à fait le même que celui sur lequel repose le procédé employé pour la détermination de la conductibilité pour la chaleur. Or, si on étudie de près ce qui se passe dans la propagation de l'électricité à travers un corps conducteur, on trouve cette assimiliation parfaitement légitime, ainsi que le prouvent des expériences récentes de Kohlrausch, que nous allons rapporter brièvement.

On réunit les pôles d'un couple voltaïque à force constante, tel qu'un couple de Daniell, par un fil métallique très-fin et passablement long, qui est replié en zigzag, de manière que les côtés des angles formés par les zigzags soient tous de même longueur. On met un point *a* du fil conducteur en communication avec le sol, et on fait ensuite communiquer avec un condensateur sensible, d'abord un point *b* du fil pris à une certaine distance de *a* du côté du pôle positif, et ensuite un point *b'* pris à la même distance de *a*, mais du côté du pôle négatif. On obtient la même tension; seulement, celle du point *b* est positive, et celle du point *b* négative; les deux tensions vont en augmentant à mesure qu'on prend les points *b* et *b'* plus loin de *a*.

Si les deux pôles sont unis par deux fils de même nature,

par exemple d'argent, de même longueur mais de diamètres différents, et soudés bout à bout de manière à ne former qu'un seul fil continu, la tension électrique augmente dans chacun des fils dans la même progression, à partir de leur point de contact, qu'on fait communiquer avec le sol; seulement, les tensions absolues dans chacun des fils sont inverses des sections. Quand, au lieu de deux fils de même nature, on en prend deux de nature différente mais de même diamètre, par exemple, un fil d'*argentane* et un de *cuivre*, de telle sorte que le premier présente une grande résistance au courant et le second une beaucoup moindre, on trouve que les tensions absolues aux extrémités de chaque fil sont proportionnelles à leurs résistances respectives, déterminées au moyen du rhéostat que nous avons décrit dans le paragraphe précédent.

On obtient les mêmes résultats en se servant d'un conducteur liquide. Une auge pleine de sulfate de cuivre, dans laquelle plonge une plaque de cuivre, renferme une cellule poreuse remplie de sulfate de zinc avec une lame de zinc immergée. Les deux plaques sont réunies par un fil métallique. L'auge est divisée en parties égales, et on plonge dans le liquide, en différents points, deux fils de cuivre dont l'un communique avec le sol et l'autre avec le plateau supérieur du condensateur. On trouve comme avec le conducteur métallique, de part et d'autre du point qui communique avec le sol, des tensions positive et négative égales. On peut même s'assurer, dans ce cas, ce qu'on ne peut faire avec un conducteur solide, que la tension est la même dans tous les points de la section transversale; ce qui confirme la loi que nous avons établie, dans le paragraphe précédent, sur la distribution uniforme de l'électricité dynamique dans toute la masse d'un conducteur homogène. Il faut dans ces expériences que les fils servant de sonde soient recouverts dans toute leur étendue, sauf à leur extrémité, d'un vernis à la gomme laque, de façon à ne prendre que l'électricité du point même avec lequel cette extrémité est en contact. Il résulte donc de ces expériences que, même dans les meilleurs conducteurs, la résistance à la propagation de l'électricité est assez grande, pour qu'entre deux couches transversales consé-

cutives il y ait une différence de tension électrique, la couche la plus rapprochée de la source électrique ayant une tension plus forte que celle qui en est la plus éloignée. C'est cette différence correspondante, pour différents conducteurs à une même distance entre deux couches prises sur chacun, que Ohm appelle la chute électrique; et les expériences qui précèdent démontrent que cette chute est directement proportionnelle à la résistance spécifique des métaux, et inverse de leurs sections.

On peut même, au moyen de ces lois, déterminer par un simple calcul l'état électroscopique de chaque point d'un circuit. Soit en effet e la force électromotrice mise en jeu dans le circuit, l la longueur réduite du circuit, et l' la longueur également réduite du conducteur qui sépare un point a du circuit du point où agit la force électromotrice; on a e' l'état électroscopique du point a, égal à $\frac{l'}{l}e$, ce qui signifie que, pour avoir la tension d'un point, il faut multiplier la force électromotrice par le rapport qui existe entre la longueur réduite de la partie du circuit comprise entre le point dont il s'agit et le point mis en communication avec le sol, et la longueur réduite du circuit tout entier. L'expérience vérifie complétement cette formule, ainsi que M. Kohlrausch l'a encore prouvé en unissant la plaque de zinc à la plaque de cuivre de la dernière expérience par un long fil très-fin de métal, plié en zigzag. Il a déterminé la tension électrique des différents points de ce fil et de la solution de sulfate de cuivre qui faisait dans ce cas, comme dans le précédent, partie du circuit. Le pôle négatif communiquait avec le sol, et les divers points touchés étaient d'abord trois points pris sur le fil conjonctif à des distances croissantes de la lame de zinc, soit du pôle négatif, puis le point de contact de la lame de cuivre avec le fil conjonctif, puis trois points pris dans le sulfate de cuivre à 2,02, à 4,02 et à 8 pouces de la même plaque de cuivre. Voici le tableau des tensions calculées et observées, mises en regard des valeurs respectives des résistances ou des longueurs réduites déterminées par le rhéostat, pour les parties du circuit comprises entre le pôle négatif et le point touché :

Points touchés.		Tensions calculées.	Tensions observées.
	l.		
a	118.5	0.93	0.85
b	237	1.86	1.85
c	355.5	2.89	2.69
d	474	3.73	3.70
e	610.3	4.80	5.03
f	745.3	5.86	5.99
g	879	6.90	6.93
h	1014	7.98	7.96

Nous pouvons donc considérer chaque couche transversale d'un conducteur homogène comme chargée de quantités différentes d'électricité sur ses deux faces, mais réparties uniformément sur chacune d'elles; quantités qui, pour une source électromotrice constante, diffèrent d'autant plus que la résistance de la couche à la propagation de l'électricité est plus grande. La détermination de cette différence pour des couches de même étendue, appartenant à des conducteurs de nature diverse, donnerait la mesure de leur résistance et par conséquent de leur conductibilité électrique. Mais ce procédé, d'une application très-difficile, ne serait pas non plus susceptible d'une exactitude assez rigoureuse. Toutefois, l'analyse qui nous y a conduit nous permet d'en employer un autre plus pratique et plus délicat, que nous exposerons dans l'instant.

Si nous rapprochons les résultats que nous venons d'obtenir des considérations que nous avons exposées, soit au commencement de ce chapitre, soit précédemment, sur la manière dont s'opère la propagation de l'électricité par la polarisation des particules consécutives, nous pouvons en conclure que la résistance à la conductibilité n'est pas autre chose que la somme des résistances qu'opposent les particules successives à leur polarisation électrique et à la neutralisation de leurs électricités contraires. Chaque particule ou molécule physique possède comme une force coercitive ou isolante plus ou moins grande, qui s'oppose à la séparation des deux électricités chez elle; puis, cette séparation opérée, il existe une résistance à la réunion des électricités contraires de deux particules consécutives, soit à cause de leur distance mutuelle plus ou moins grande, soit à cause

de leur nature même plus ou moins coïbente. Or, pour qu'il y ait propagation de l'électricité, il faut que la résistance à la séparation et la résistance à la réunion soient également surmontées. La première tient à la nature même des particules, la seconde tient à la fois à leur nature et à leur mode d'agrégation. C'est en tenant compte à la fois de ces deux éléments si différents qu'on peut expliquer que la même circonstance extérieure, par exemple l'élévation de température, puisse dans certains cas favoriser la conductibilité et dans d'autres cas la diminuer, selon qu'elle agit sur les particules mêmes ou sur leurs positions relatives. L'état électrique des particules d'un mince filet peut être assimilé à celui d'une succession de bouteilles de Leyde, ou mieux de carreaux étincelants qui se chargent tous mutuellement par influence, sauf le premier et le dernier, qui sont respectivement en communication directe avec une source d'électricité positive et une de négative. Arrivées à un certain degré de tension, les armures opposées des bouteilles ou des carreaux consécutifs se déchargent les unes sur les autres. Il en résulte une décharge générale d'une intensité uniforme dans tout le système, et un excès d'électricité sur chaque bouteille ou carreau qui va en augmentant jusqu'aux carreaux extrêmes, excès qui est positif pour ceux qui sont du côté de la source positive, et négatif pour ceux qui sont tournés du côté de la source négative. L'intensité de cet excès doit dépendre du degré de résistance plus ou moins grand que les électricités contraires des armures opposées éprouvent à se réunir, et plus il est considérable, moins la décharge ou le courant sont forts. Cette succession de charges et de décharges qui, dans une série de bouteilles de Leyde, exige un certain temps pour s'opérer, a lieu instantanément dans une série de particules; c'est ce qui fait que le courant est continu et que l'état de tension des différentes molécules est constant, conformément aux observations de M. Kohlrausch.

Il est probable que les effets de chaleur, de lumière et de secousses physiologiques qui accompagnent presque toujours la transmission de l'électricité dynamique, sauf dans les cas où la résistance est très-faible, sont intimement unis avec les deux

causes de résistance que nous avons indiquées. Quant aux décompositions chimiques, elles doivent tenir essentiellement à l'arrangement que la polarisation des particules détermine dans le mode de groupement des atomes dont elles se composent, et dans les perturbations que les décharges qui suivent la polarisation apportent à cet arrangement.

Nous devons remarquer que la manière dont nous envisageons la conductibilité électrique diffère notablement du point de vue de M. Faraday, qui, partant du principe que l'espace qui sépare les particules des corps n'est pas conducteur, puisque, s'il en était autrement, l'espace étant partout identique, les corps devraient être tous également conducteurs, en avait tiré une conséquence contraire à la théorie atomique. En effet, regardant la continuité comme une condition essentielle de la conductibilité électrique, et par conséquent considérant comme indispensable que l'espace intermoléculaire soit conducteur, puisque c'est la seule partie continue d'un corps, il avait conclu que la théorie atomique est fausse, puisqu'elle conduit à admettre à la fois que cet espace doit être conducteur et qu'il ne doit pas l'être. Quant à nous, c'est à la molécule seule que nous attribuons la propriété d'être plus ou moins conductrice ou isolante; la conductibilité n'est que le résultat de la facilité plus ou moins grande qu'ont les particules consécutives à se polariser à travers l'espace qui les sépare, et qui est nécessairement isolant. Nous pouvons ainsi concilier de la manière la plus satisfaisante les phénomènes de la conductibilité électrique avec la théorie atomique, établie si solidement par l'étude des phénomènes chimiques et physiques.

Après ces notions préliminaires, qui nous ont paru indispensables pour pouvoir se faire une idée juste de la conductibilité électrique, nous passerons à la description des procédés les plus propres à déterminer exactement le pouvoir conducteur des différents corps solides et liquides.

Priestley, et après lui Harris et Riess, ont proposé de déterminer le pouvoir conducteur des différents métaux, en faisant passer la même décharge électrique à travers des tiges ou des fils de même diamètre et de même longueur, mais de nature

différente, et en concluant leur conductibilité relative du degré de réchauffement plus ou moins grand qu'ils éprouvaient. Wilkinson a fait usage de la même méthode, mais en remplaçant la décharge par un courant électrique. Ce mode de détermination repose sur le principe que le degré de réchauffement qu'éprouve un fil, par le passage d'une quantité donnée d'électricité, est inverse de sa conductibilité électrique ; principe qui ne peut être admis *à priori*, car il ne peut être établi qu'autant qu'on a un moyen direct de déterminer la conductibilité, et il ne peut pas par conséquent servir à la déterminer.

La même objection est applicable à la méthode de Christie, fondée sur le principe que l'intensité des courants d'induction est proportionnelle, toutes les autres circonstances restant les mêmes, au pouvoir conducteur de la substance soumise à l'induction. Faraday avait en effet remarqué, dès l'origine de sa découverte de l'induction, que les courants induits développés dans des hélices faites avec des fils de même diamètre et de même longueur, mais de nature différente, ont une intensité d'autant plus grande que le pouvoir conducteur des fils est plus considérable. Mais il y a encore ici, dans l'emploi de cette méthode, pour déterminer la conductibilité, un cercle vicieux qui ne nous permet pas d'en faire usage dans ce but.

Davy s'était servi d'un moyen plus direct, et qui l'avait conduit à des résultats qui ont été en grande partie confirmés par des méthodes plus exactes. Il prenait des fils de divers métaux, de même longueur et de même diamètre, et cherchait combien chacun d'eux pouvait décharger de couples voltaïques. Pour s'assurer si un fil déchargeait entièrement plusieurs couples, il ajoutait deux autres fils en argent aux deux pôles de la pile, et les faisait plonger dans de l'eau conductrice, qui était décomposée si tout le courant ne passait pas par le fil principal ; l'absence de tout dégagement de gaz était le signe que ce fil opérait entièrement la décharge. Cependant, en vertu de sa tendance à la dissémination, le courant devait toujours passer à travers l'eau dans une certaine proportion, trop petite, il est vrai, pour que la décomposition fût sensible. Malgré les imperfections de ce procédé, Davy avait réussi à établir directement les deux lois

générales de la conductibilité, savoir : que les pouvoirs conducteurs sont en raison inverse des longueurs, et en raison directe des sections des fils métalliques qui conduisent l'électricité.

M. Becquerel père avait, le premier, employé un procédé plus exact, qui consiste à faire usage du galvanomètre différentiel, et qui lui permettait de se mettre ainsi à l'abri des variations d'intensité du courant électrique. Il obligeait le courant à se partager entre les deux fils du galvanomètre, de manière que chacune de ses deux portions cheminât en sens inverse, et maintînt l'aiguille aimantée au zéro lorsqu'elles étaient égales. Introduisant dans ces deux circuits partiels des fils de différente nature et de même diamètre, il pouvait toujours, en les raccourcissant ou en les allongeant, ramener l'aiguille au zéro, et juger ainsi quelles étaient les longueurs des fils métalliques équivalentes en conductibilité. Il avait vérifié également, de cette manière, les lois que Davy avait déjà trouvées d'une façon approximative, et avait déterminé les pouvoirs conducteurs relatifs des différents métaux.

M. Pouillet avait fait plus tard usage d'une méthode analogue, avec cette différence, qu'il employait deux sources électriques parfaitement égales, dont les courants passaient en sens contraire dans les deux fils du galvanomètre différentiel ; un fil de platine servait de fil étalon : c'est à sa conductibilité qu'on comparait celle du fil d'épreuve, en lui donnant une longueur qui affaiblît son courant autant que l'interposition du fil d'épreuve affaiblissait le courant obligé de le traverser.

Les résultats numériques obtenus par M. Pouillet, quant aux pouvoirs conducteurs des différents métaux, ne concordent pas avec ceux de M. Becquerel, ce qui peut tenir à quelques différences dans la constitution moléculaire et dans le degré de pureté des échantillons soumis à l'expérience, circonstances qui ont une grand influence sur la conductibilité électrique, ainsi que l'a démontré M. E. Becquerel, qui a repris dernièrement cette question, en apportant à son étude une grande précision.

C'est également le galvanomètre différentiel qu'il a employé, mais il a eu soin d'apporter à sa construction la précaution indiquée par Poggendorff, de tourner les deux fils du galvano-

mètre l'un autour de l'autre, afin que si les deux courants égaux passent en sens inverse dans l'instrument, leur action soit bien la même, et que l'aiguille reste parfaitement au zéro. M. E. Becquerel a fait en outre usage du rhéostat de Wheatstone, dont le fil, auquel on peut donner la longueur que l'on veut, fait constamment partie de l'un des circuits du galvanomètre différentiel, tandis que le fil dont on cherche le pouvoir conducteur fait partie de l'autre. La roue dentée du rhéostat porte 108 divisions, et on peut estimer le dixième de chaque division, de sorte que la circonférence d'une des spires de l'hélice étant de 236 millimètres, on peut mesurer l'allongement ou le raccourcissement du fil de laiton de l'instrument à $\frac{1}{1000}$ de 236 millimètres, soit à 0 $^{\text{mill.}}$, 2 près. Le fil métallique dont on veut trouver le pouvoir conducteur est tendu entre deux pinces en cuivre attachées à deux montants, et placées à une distance l'une de l'autre telle que le fil a 1^{m} 50 de longueur. Une règle en cuivre rouge très-massive est fixée solidement au-dessus du fil et parallèlement à sa longueur ; sur cette règle divisée glisse à frottement un montant en cuivre, qu'à l'aide d'une vis on peut arrêter dans une position déterminée. L'extrémité supérieure de ce montant est formée d'une pince épaisse qui prend le fil en un de ses points, de sorte qu'en promenant le montant le long de la règle, on met dans le circuit une longueur quelconque qu'on mesure avec une grande exactitude. On peut négliger la conductibilité de la règle par rapport à celle du fil, vu ses dimensions considérables. Voici, du reste, la figure de l'appareil dans son ensemble (fig. 185). HH′ est le galvanomètre différentiel; FF′ le couple voltaïque qui sert à l'expérience; EE′ le rhéostat avec M sa manivelle, qui fait mouvoir les deux cylindres de cuivre et de bois, de manière que le fil s'enroule autour de l'un pendant qu'il se déroule sur l'autre; RR′ les deux montants qui portent les pinces AA′, entre lesquelles le fil d'épreuve est tendu; *ab* la règle de cuivre divisée, et *e*C le montant métallique qui glisse à frottement juste le long de cette règle, de manière à mettre dans l'un des circuits partiels la longueur CA du fil soumis à l'expérience. Le courant parti de *c* se partage entre les deux conducteurs *cD* et *cO*, de ma-

nière à passer, la première partie, à travers le fil du rhéostat DD′, et de là à aller par le conducteur D′N′ traverser l'un des fils du galvanomètre, la seconde partie à travers les conducteurs *o*P,*o*P′,*o*P″, pour de là arriver, par le support *e*C, au fil d'épreuve EA, et cheminer ensuite par AN au second fil du galvanomètre; puis les deux courants, après avoir traversé en sens contraire les deux fils du galvanomètre différentiel, se réunissent en G, et trouvent là le conducteur G*z* qui ferme le circuit.

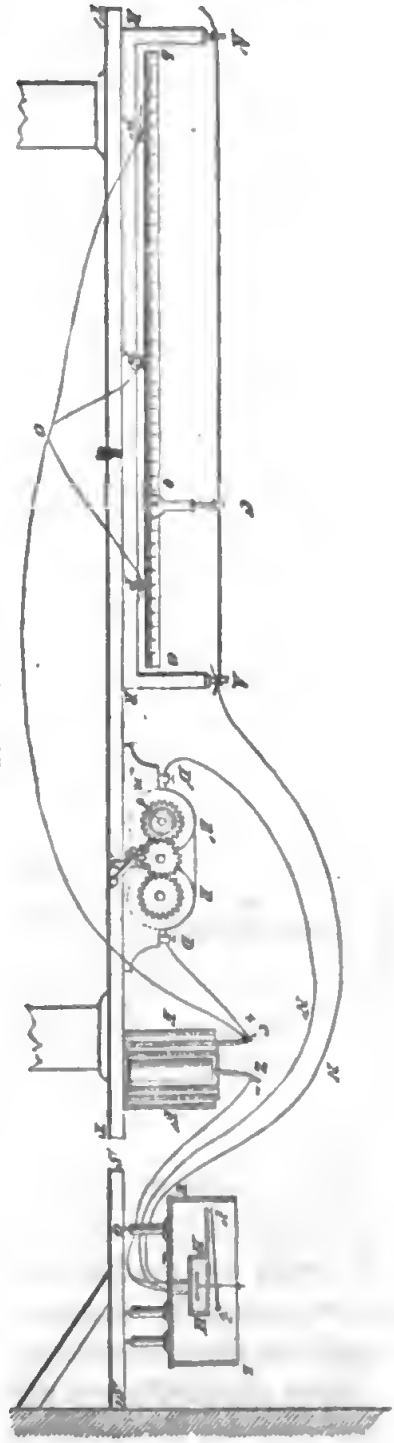


Fig. 185.

M. E. Becquerel a d'abord vérifié, au moyen de cet appareil, la loi déjà indiquée, que le pouvoir conducteur est en raison inverse de la longueur et directe de la section du fil métallique.

Un premier tableau renferme les expériences faites, à la température de 12° 50, avec un fil de fer de 0$^{mill.}$ 3223 de diamètre et de longueur variable. La première colonne indique, par la position de la pince C*e*, les longueurs variables du fil; la seconde, le nombre des divisions du rhéostat, qui donnent des résistances égales à celles des longueurs correspondantes des fils de fer; la troisième, le rapport entre ces deux quantités.

Or, ce rapport étant constant, il en résulte que la résistance que détermine l'introduction du fil de fer dans le circuit augmente bien proportionnellement à la longueur de ce fil, ou, ce qui revient au même, que sa conductibilité est inverse de sa longueur.

Voici ce tableau :

POSITION de la pince Ce sur la règle divisée, ou longueur du fil de fer.	DIVISIONS de la roue dentée, ou longueur du fil etalon.	RAPPORT entre les longueurs correspondantes des deux fils.
0 centim.		
20	162.6	8.13
40	325.2	8.13
60	485.0	8.08
80	643.3	8.04
100	805.6	8.06

Un second tableau renferme les expériences faites avec deux fils de fer de diamètres différents. On obtient, pour 1 mètre de longueur, une résistance représentée comme suit :

RÉSISTANCE en divisions du rhéostat.	DIAMÈTRES des fils.	CARRÉS des diamètres.	PRODUIT DES CARRÉS des diamètres par les résistances.
157.08	0.7370	0.5322	85.717
928.65	0.3037	0.0922	85.622

Ainsi l'augmentation de résistance occasionnée par l'introduction, dans le circuit, d'un fil de fer d'une certaine longueur, est à celle que produit l'introduction d'un fil de même longueur, mais d'un diamètre différent, inversement comme les carrés des deux diamètres.

Après ces expériences préliminaires, viennent celles qui sont faites avec des fils de différents métaux, dont il faut avoir soin

de bien mesurer exactement les diamètres. Mais comme quelques-uns, lorsqu'ils sortent de la filière, sont écrouis et non pas tous, et que l'écrouissage influe sur la conductibilité, ainsi que M. Pouillet l'a observé, il est important de les recuire, afin qu'ils soient tous, autant que possible, dans les mêmes conditions moléculaires. La différence sous le rapport de la conductibilité, entre un fil écroui et le même fil recuit, est en effet assez sensible, comme on peut le voir par le tableau suivant :

FILS d'un diamètre de 0mm,3.	RÉSISTANCES.		POUVOIRS CONDUCTEURS.		Rapport de la conductibilité du metal recuit et de l'ecroui.
	Écroui.	Recuit.	Écroui.	Recuit.	
Argent pur.	123.509	115.416	93.448	100.000	1.0701
Cuivre pur.	119.539	126.222	89.084	91.439	1.0264
Or pur.	179.260	176.320	64.385	65.458	1.0166
Fer.	951.098	942.046	12.124	12.246	1.0101
Platine.	1435.158	1416.007	8.042	8.147	1.0130

On doit remarquer que dans ce tableau on a ramené la résistance, et par conséquent la conductibilité des fils, à ce qu'elle doit être, en leur supposant à tous le même diamètre; on a également rapporté toutes les conductibilités à celle de l'argent recuit, qui est la plus forte de toutes.

La température influe aussi, comme l'écrouissage, d'une manière notable sur la conductibilité des métaux. Pour étudier cette influence, M. Becquerel enroule le fil soumis à l'expérience autour d'un tube de verre, de façon que les spires de l'hélice qu'il forme soient bien isolées les unes des autres, puis il en fait aboutir les deux extrémités à deux gros bouts de cuivre rouge, dont la conductibilité très-bonne ne varie pas sensiblement par rapport à celle du fil lui-même, sous l'influence de la température à laquelle il est exposé. Il place le tube garni de son fil dans un bain d'huile, qu'il porte graduellement de 0 à 100°, et qu'il refroidit de même de 100° à 0°; puis il détermine les variations de conductibilité du fil au moyen du rhéostat. Cette variation suit d'une manière assez ré-

gulière, dans le même métal, celle de la température à laquelle elle est en général proportionnelle; mais elle diffère beaucoup d'un métal à l'autre, et n'est point en rapport avec sa conductibilité absolue. On peut en juger d'après le tableau suivant, qui renferme les pouvoirs conducteurs relatifs des différents métaux à 0° et à 100°. L'ordre est bien le même, sauf pour le plomb et le platine, qui changent de place; mais les rapports numériques qui indiquent leur conductibilité relative sont notablement altérés, excepté pour le cuivre, le cadmium et le zinc.

SUBSTANCES.	POUVOIRS conducteurs à 0°.	POUVOIRS conducteurs à 100° par rapport à l'argent à 0°.	RAPPORT des pouvoirs conducteurs à 100°.
Argent pur recuit.	100	71. 316	100
Cuivre pur recuit.	91. 519	64. 919	91. 30
Or pur recuit.	64. 960	48. 489	67. 992
Cadmium.	24. 579	17. 506	24. 547
Zinc.	24. 63	17. 596	24. 673
Etain.	14. 014	8. 657	12. 139
Fer recuit.	12. 350	8. 587	11. 760
Plomb.	8. 277	5. 764	8. 078
Platine recuit.	7. 933	6. 688	9. 378
Mercure.	1.7387	1.5749	2.2083

Il est fâcheux que M. E. Becquerel n'ait pas apprécié l'influence de l'élévation de la température sur les métaux au delà de 100°. Heureusement que M. Lenz avait fait cette détermination jusqu'à 200°. Voici le tableau des résultats qu'il avait obtenus :

	A 0°.	A 100°.	A 200°.
Argent. . .	136.25	94.45	68.72
Cuivre. . .	100.00	73.00	54.82
Or	79.79	65.20	54.49
Étain . . .	30.84	20.44	14.78
Laiton. . .	29.33	24.78	21.45
Fer. . . .	17.74	10.87	7.00
Plomb. . .	14.62	9.61	6.76
Platine. . .	14.16	10.93	9.00

Ce tableau, dont les éléments numériques diffèrent peu de celui de M. Becquerel, corrobore la remarque que nous avons déjà faite quant à l'influence qu'exerce la température, non-seulement sur la conductibilité absolue, mais même sur la conductibilité relative des métaux. Ainsi nous voyons le pouvoir conducteur de l'or, qui, à 0°, n'est que les 4/5 de celui du cuivre, lui devenir égal à 200°; le laiton, qui à 0° est inférieur à l'étain, lui devenir supérieur à 100°, et encore plus à 200°; enfin le platine, qui à 0° est inférieur au plomb et au fer, leur devenir supérieur à 100° et à 200°. Évidemment les métaux les plus fusibles sont ceux qui varient le plus vite sous l'influence d'une température élevée dans l'échelle de la conductibilité, preuve de l'influence qu'exerce la constitution moléculaire sur cette propriété des corps.

Il est encore, outre celles que nous avons mentionnées, quelques substances solides dont on a déterminé le pouvoir conducteur Ainsi Lenz a trouvé, en appelant toujours 100 le pouvoir conducteur du cuivre,

Antimoine	8.9
Mercure.	4.7
Bismuth.	2.6

mais il n'indique pas l'influence de l'élévation de la température sur la conductibilité de ces métaux.

Le palladium est un des métaux sur lesquels les expériences des divers physiciens ont donné les résultats les moins concordants. Ainsi, tandis que Pouillet trouve qu'il est le plus conducteur de tous les métaux, E. Bequerel et Riess le placent après l'argent, le cuivre, l'or, le cadmium, le zinc et l'étain. Ces divergences tiennent probablement à quelques différences dans le degré de pureté des échantillons livrés à l'expérience.

La conductibilité électrique du charbon n'a jamais été déterminée avec précision. Cela tient aux différences qu'elle présente, depuis le diamant qui est complétement isolant, jusqu'au graphite et à la plombagine qui conduisent très-bien. M. Kemp a montré l'influence considérable qu'exerce l'élévation de température sur le pouvoir conducteur du charbon de

bois, qu'elle augmente considérablement. Mais cette influence, qui est contraire à celle qui est exercée sur les métaux, en diffère également en ce qu'elle est permanente, c'est-à-dire que c'est le fait d'avoir été exposé à une très-haute température qui rend le charbon de bois meilleur conducteur. Ainsi, M. Violette, dans des recherches récentes sur les charbons de bois, a trouvé que les fragments de charbon de bois de bourdaine, préparés à la température de 1500 degrés, sont meilleurs et plus également conducteurs que le graphite qu'on extrait des cornues à gaz. Du reste, nous y reviendrons à l'occasion de l'arc voltaïque qu'on obtient avec deux pointes du charbon.

La conductibilité des métaux pour l'électricité est un phénomène, avons-nous dit en commençant, qui a beaucoup de rapport avec leur conductibilité pour la chaleur; nous en avons une preuve directe dans le fait déjà observé par M. le professeur Forbes, il y a vingt ans, que l'ordre de conductibilité des métaux est le même pour la chaleur que pour l'électricité. Voici un tableau dressé par MM. Wiedemann et Franz à la suite de nouvelles recherches qu'ils ont faites sur le pouvoir conducteur des métaux pour la chaleur, qui met ce rapprochement en évidence d'une manière remarquable.

NOMS DES MÉTAUX.	CONDUCTIBILITÉ POUR L'ÉLECTRICITÉ.			CONDUCTIBILITÉ pour la chaleur.
	Riess.	Becquerel.	Lenz.	
Argent.	100	100	100	100
Cuivre.	66.7	91. 5	73.3	73.6
Or.	59.0	64. 9	58.5	53.2
Laiton.	18.4	»	21.5	23.6
Étain.	10.0	14. 0	22.6	14.3
Fer.	12.0	12.35	13.0	11.9
Plomb.	7.0	8.27	10.7	8.5
Platine.	10.5	7.93	10.3	6.4
Argentane.	5.9	»	»	6.3
Bismuth.	»	»	1.9	1.8

Enfin il existe un grand nombre de substances minérales qui peuvent transmettre un courant électrique, mais dont on n'a

pu déterminer ni le rang ni le coefficient numérique de conductibilité. MM. Henrici et Hancmann, d'une part, M. Wartman, de l'autre, ont fait sur ce sujet de nombreuses expériences. Le dernier de ces physiciens a examiné 319 espèces minérales, dont il a trouvé 252 isolantes, et par conséquent 67 seulement conductrices. La difficulté de ramener ces substances aux mêmes dimensions, et même de leur donner des volumes géométriques susceptibles d'être évalués exactement, rend impossible de déterminer leurs rapports de conductibilité, non plus que les variations de conductibilité qui peuvent se manifester dans un même minéral, par exemple, suivant que l'électricité s'y propage dans un sens ou dans l'autre. Au reste, il n'y a rien d'absolu dans la propriété conductrice, car entre tous les minéraux les plus conducteurs et ceux qui sont les plus isolants, il y a tous les degrés intermédiaires. C'est ce que nous constaterons plus loin dans le paragraphe où nous nous occuperons de la propagation de l'électricité dans les corps mauvais conducteurs.

La détermination des pouvoirs conducteurs des liquides a été obtenue en suivant les mêmes procédés que pour les solides; il faut seulement avoir égard à deux circonstances qui ne se présentent pas quand il s'agit des solides. La première, c'est la résistance au passage qui a lieu dans la transmission du courant électrique à la surface de contact du liquide et de l'électrode de métal, résistance tout à fait indépendante de la conductibilité électrique proprement dite du liquide; la seconde, c'est l'altération que subit très-promptement le liquide soumis à l'expérience par l'effet de la décomposition chimique qu'il éprouve. Pour obvier à ce dernier inconvénient, il faut opérer le plus vite possible et disposer l'appareil de manière que les substances dégagées par la décomposition n'altèrent pas le liquide; dans ce but, on cherche à les absorber, si elles sont gazeuses, par la substance même des électrodes, lorsque c'est possible, comme pour l'oxygène, ou bien on les laisse se déposer si elles sont solides, dans la partie du liquide qui est au fond du vase et qu'on a soin de ne pas mettre dans le circuit.

Il est plus difficile de se mettre à l'abri du premier inconvé-

nient. M. E. Becquerel emploie dans ce but un procédé qui n'est qu'une modification de celui qu'a proposé M. Wheatstone, et qui nous a servi à prouver que pour les liquides aussi bien que pour les solides, la résistance à la conductibilité est proportionnelle à la longueur de la colonne conductrice. Mais au lieu d'un seul tube, M. E. Becquerel en emploie deux, afin de pouvoir faire usage, comme pour les solides, du galvanomètre différentiel, et dans chacun de ces tubes sont deux électrodes de platine, l'un fixe, l'autre mobile comme un piston, ce qui permet d'allonger ou de raccourcir à volonté la colonne liquide.

L'appareil est représenté (fig. 186). Ce sont deux éprouvettes

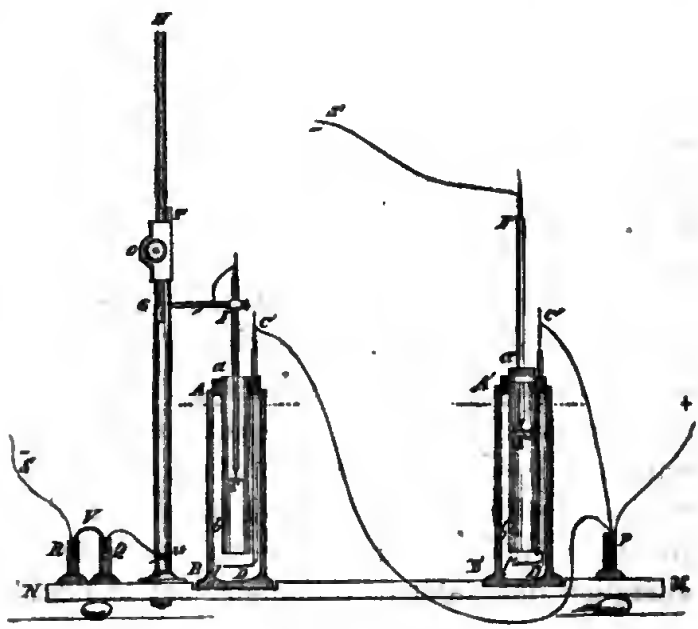


Fig. 186.

en verre à pied AB, A'B', de 4 à 5 centimètres de diamètre et de 3 décimètres de hauteur. Elles reposent dans des entaillures pratiquées dans une planche MN bien horizontale. Dans ces éprouvettes, plongent deux tubes cylindriques *ab*, *a'b'*, retenus en haut par des bouchons, et s'arrêtant à 4 centimètres du fond de ces mêmes éprouvettes; ils ont le même axe qu'elles. Ces tubes ont exactement 21 millimètres, 54 de diamètre intérieur, mesuré par le poids d'une colonne d'eau d'une certaine

hauteur. Dans ces tubes, placés verticalement, peuvent se mouvoir de haut en bas et de bas en haut des lames circulaires de platine E, E′ horizontales, d'un diamètre un peu plus petit que celui de ces tubes, et attachées à des fils de platine soudés dans des tubes de verre FE, F′E′. Des lames de différents métaux D*l*, D′*l*′, suivant les expériences, sont placées horizontalement au fond des éprouvettes, à la partie inférieure des tubes *ab*, *a′b′*. Ces lames sont attachées à des fils de même métal qui passent dans des tubes DC, D′C′. Le tube EF est attaché à une tige GF communiquant à une crémaillère, de telle sorte qu'on peut élever ou abaisser le disque E à l'aide de cette crémaillère, et connaître à l'aide du vernier T, à 1/10 de millimètre près, et même au delà, de combien on fait varier la position de E dans le tube. L'autre lame semblable E′ monte ou descend à l'aide du tube F′E′ qui passe à frottement dans le bouchon A′.

Cela fait, si l'on met dans les éprouvettes le liquide à l'aide duquel on veut opérer, et que l'on fasse passer un courant entre la lame E et la lame DL, en élevant ou abaissant E, on introduira ou l'on retranchera du circuit une colonne liquide ayant même diamètre que le tube *ab*, et pour longueur, l'élévation ou l'abaissement de la lame. Le liquide compris entre l'éprouvette et le tube intérieur n'est pas dans le circuit. On a disposé ainsi l'appareil afin que les produits formés autour de la lame positive tombent au fond de l'éprouvette, et n'altèrent pas la conductibilité du liquide placé dans le tube *ab*. On attache ensemble les fils CD, C′D′, qui plongent dans un godet plein de mercure P, et qui, par ce moyen, communiquent avec le pôle positif d'un ou de plusieurs couples. Le pôle négatif s'attache au point G de jonction des deux extrémités du fil du galvanomètre. Les deux autres extrémités, N et N′, de ces mêmes fils, s'attachent aux extrémités S, S′ qui communiquent aux lames circulaires E, E′; N s'attache directement; N′ communique par l'intermédiaire des deux godets R, Q, et du cuivre UGF de la crémaillère. On voit donc que les deux circuits PC′E′F′S′, PCEFS dans lesquels sont deux colonnes liquides E′D′, ED, remplacent les circuits tout métalliques

de la fig. 185 F'OCAN, F'E'N'. Si donc on fait passer un courant provenant de un, deux ou quatre couples au plus semblables au couple FF' de la fig. 185, le courant se partagera entre les deux circuits, les lames E, E' étant en haut des tubes ; l'aiguille du galvanomètre se déviera un peu à droite ou à gauche, car les deux circuits ne sont pas de prime abord identiques en conductibilité : alors à l'aide de la crémaillère OH, on élèvera ou l'on abaissera E, jusqu'à ce que l'aiguille soit revenue au zéro. En général, à moins de circonstances particulières comme on le verra plus loin, elle s'y maintiendra; de telle sorte qu'en élevant ou abaissant E de 1 millimètre, l'aiguille est déviée à droite ou à gauche du zéro. Une fois le zéro obtenu, les deux circuits sont identiques en conductibilité; on enlève le fil en cuivre V qui établit la communication entre les godets G et R, et l'on met à la place des hélices de fil de platine ou de cuivre d'une longueur connue; aussitôt l'aiguille du galvanomètre est chassée dans un sens qui indique que le circuit PCEFS a une résistance plus considérable de la valeur du fil mis à la place de V.

Si alors on abaisse la lame E avec la crémaillère O, l'aiguille reviendra à zéro, et lorsqu'on sera arrivé à ce point et qu'elle s'y maintiendra, on notera de combien on a descendu la lame. Alors la longueur d'une colonne liquide ayant pour diamètre le diamètre du tube *ab*, et pour longueur la course de la lame E, sera équivalente en résistance au fil mis entre R et Q à la place de V. Cette résistance sera indépendante de la résistance au passage des liquides dans les solides; car les sections sont identiques dans les deux expériences, comme dans l'appareil de M. Wheatstone, et les courants ramenés à l'égalité. Seulement ici, on fait varier la hauteur de la colonne liquide employée pour trouver la valeur en résistance de l'hélice placée en V; c'est l'inverse du procédé de Wheatstone. Il faut employer plusieurs hélices, suivant les liquides dont on fait usage.

Si l'on a affaire à un liquide qui renferme un sel métallique décomposé par le courant, alors il faut, en général, mettre pour lames positives inférieures DL, D'L', des lames de même

nature que le métal dissous; car il se reforme au pôle positif le sel décomposé par le courant. Si l'on ne peut pas avoir ce métal en lames, il faut prendre un métal oxydable; le sel formé restant au bas de l'éprouvette n'entre pas dans le tube *ab*, et dans le cours de l'expérience ne dérange pas la mesure du pouvoir conducteur. Il faut donc éviter qu'il ne se dégage du gaz sur DL et D'L'. Le métal se déposant sur E et E', il n'y a pas de contre-courant, et l'aiguille du galvanomètre se maintient au zéro, de telle sorte qu'on a la résistance avec une grande précision.

Si l'on fait usage d'un liquide autre qu'une solution d'un sel métallique, alors il faut toujours prendre pour lames positives des lames oxydables, pour éviter le dégagement de gaz en bas de l'éprouvette, et n'agir qu'avec le plus faible courant possible, afin qu'il ne se dégage que peu de gaz en E et E' : on incline un peu ces lames pour que l'hydrogène ne reste pas adhérent; mais malgré cela l'aiguille du galvanomètre n'est pas fixe à zéro, elle oscille un peu à droite et à gauche, et l'on saisit la position où les oscillations de chaque côté ont même amplitude. Du reste, on ne se trompe pas dans ce cas de 1/2 millimètre sur la longueur de la colonne liquide. Il faut, toujours en tout cas, répéter plusieurs fois cette opération, afin de s'assurer si l'on retombe sur les mêmes nombres.

Les expériences de M. Becquerel ont d'abord porté sur l'influence qu'exerce sur la conductibilité de différentes dissolutions salines la quantité plus ou moins grande d'eau qu'elles renferment. Ainsi en faisant usage d'une hélice ayant 3 mètres de fil de platine, il a opéré sur 3 dissolutions de sulfate de cuivre à 9° 25 de température, l'une saturée, la seconde renfermant 1/2, la troisième 1/4 de sulfate en volume.

Le tableau suivant donne les longueurs des colonnes liquides équivalentes pour chaque dissolution à 3 mètres de fil de platine, ce qui permet d'en déduire leurs pouvoirs conducteurs, celui de l'argent étant 100,000,000.

DISSOLUTIONS.	SULFATE de cuivre contenu.	LONGUEUR des colonnes liquides.	POUVOIRS conducteurs.
		cent.	
Saturée.	1	9. 55	5.42
Étendue de façon que le volume soit double.	$\frac{1}{2}$	6.135	3.47
Étendue de façon que le volume soit quadruple.	$\frac{1}{4}$	3. 68	2.08

M. Pouillet avait trouvé, d'après la méthode de M. Wheatstone, un résultat très-rapproché de celui de M. Becquerel, pour le sulfate de cuivre. Il avait obtenu, pour ce sel, un pouvoir conducteur 16 millions de fois plus faible que celui du cuivre. Or le pouvoir conducteur du cuivre étant les 91/100 de celui de l'argent, on voit que le nombre 5,42 obtenu par M. Becquerel est bien rapproché de celui de M. Pouillet.

Des expériences semblables ont été faites par M. E. Becquerel sur du bichlorure de cuivre, du nitrate de cuivre, du chlorure de sodium, du sulfate de zinc à différents degrés de concentration. Il a remarqué que dans quelques sels, tels que le nitrate de cuivre et le sulfate de zinc, le pouvoir conducteur augmente à mesure que l'on étend la dissolution jusqu'à une certaine limite à laquelle il atteint un maximum, puis ensuite diminue de telle sorte qu'on peut avoir une dissolution très-étendue qui ait le même pouvoir conducteur qu'une solution très-concentrée. J'avais déjà, il y a vingt-cinq ans, fait la même observation en ce qui concerne l'acide sulfurique, qui est plus conducteur quand il est mélangé avec une certaine proportion d'eau, que plus concentré ou plus étendu; et, ce qu'il y a d'assez remarquable, c'est que la dissolution d'acide sulfurique la plus conductrice est précisément celle qui exerce l'action chimique la plus vive sur les métaux oxydables, tels que le zinc, le fer, etc., etc.

M. Matteucci est arrivé à un résultat semblable au moyen

d'un procédé que nous décrivons à la fin de ce paragraphe, en rapportant d'autres expériences du même physicien. Voici le tableau des pouvoirs conducteurs de l'acide sulfurique à divers états de densité, en prenant pour unité le pouvoir conducteur de cet acide à la densité de 1,259.

Densité de l'acide.	Pouvoir conducteur.
1.030	0.301
1.066	0.682
1.100	0.760
1.143	0.935
1.259	1.000
1.340	0.951
1.384	0.850
1.482	0.622
1.667	0.344

L'acide nitrique et l'acide hydrochlorique ont également l'un et l'autre un maximum de conductibilité à un certain état de densité; ainsi, suivant M. Matteucci, l'acide nitrique à 1,315 de densité conduit mieux que celui qui a une plus grande ou une moindre densité. L'acide hydrochlorique à 1,186 de densité conduit moins bien qu'à 1,162, et mieux à 1,114 qu'à 1,076. Cependant, avec ces deux acides, les effets sont moins prononcés qu'avec l'acide sulfurique.

Il y a donc une relation évidente entre la conductibilité électrique des liquides et leurs propriétés chimiques; c'est un point sur lequel nous reviendrons quand nous nous occuperons de la décomposition électro-chimique des liquides. Voici du reste un tableau assez exact des pouvoirs conducteurs de quelques liquides.

SUBSTANCES.	DENSITÉS.	TEMPÉRATURES.	POUVOIRS conducteurs.
Argent pur.	»	0°.00	100.000.000
Eau saturée de sulfate de cuivre.	1.1707	9 .25	5. 42
Eau saturée de chlorure de sodium à 9°50.	»	13 .40	31. 52
Eau saturée de nitrate de cuivre.	1.6008	13 .00	8.995
Eau saturée de sulfate de zinc.	1.4410	14 .40	5. 77
250 grammes d'eau et 30 grammes d'iodure de potassium.	»	12 .50	11. 20
220 cent. cub. d'eau et 20 cent. cub. d'acide sulfurique à 1 atome d'eau.	»	19 .00	88. 68
Acide azotique du commerce à 36°.	»	13 .10	97. 77
30 grammes de protochlorure d'antimoine, 120 cent. cub. d'eau et 100 cent. cub. d'acide chlorhydrique.	»	15 .00	112. 01

Remarquons que la dissolution de nitrate de cuivre saturée, quand elle est étendue d'eau de manière à occuper un volume double, a un pouvoir conducteur à peu près double, 17,073 au lieu de 8,995; et le sulfate de zinc, dans les mêmes conditions, a pour pouvoir conducteur 7,13 au lieu de 5,77; c'est, pour ces deux dissolutions salines, également leur maximum de conductibilité.

L'influence de la température est très-sensible sur le pouvoir conducteur des liquides pour l'électricité; mais cette influence exerce ici une action contraire à celle qu'elle exerce sur les métaux, c'est-à-dire que l'élévation de la température augmente la conductibilité des liquides au lieu de la diminuer. Ce fait avait déjà été signalé en 1826 par M. Marianini, qui avait observé qu'on augmentait l'intensité du courant d'un couple en chauffant le liquide de ce couple; mais ici l'effet était com-

plexe, parce qu'il pouvait aussi bien tenir à un accroissement produit par la chaleur dans l'action électromotrice des métaux du couple qu'à une augmentation dans la conductibilité électrique du liquide. Plus tard, MM. E. Becquerel et Hankel ont constaté d'une manière directe qu'effectivement l'élévation de température accroît le pouvoir conducteur des liquides. M. E. Becquerel s'est servi dans ce but des mêmes moyens qui lui avaient servi à mesurer la conductibilité propre des liquides, et voici les résultats qu'il a obtenus avec trois liquides. Le pouvoir conducteur de chacun d'eux étant considéré comme l'unité, la conductibilité pour un accroissement de température d'un degré a augmenté :

Pour la solution saturée de sulfate de cuivre. . . .	de	0.0286
Pour la solution étendue de sulfate de zinc.	de	0.0223
Pour l'acide nitrique du commerce	de	0.0263

Ce qui fait pour chacun de ces liquides une augmentation de plus de 2/100 de sa conductibilité pour un degré d'élévation de température.

Les expériences de M. Hankel ont été faites suivant une méthode assez semblable à celle de M. E. Becquerel, au moyen d'un galvanomètre différentiel entre les deux fils duquel se partageait un courant produit par deux ou trois couples de Daniell, de manière à y cheminer dans des directions opposées. Dans le circuit de l'un des fils se trouvait le liquide soumis à l'expérience, placé dans un tube en forme de U ; et dans le circuit de l'autre, des hélices de fil de fer, dont la résistance était exactement connue, et dont on variait les longueurs jusqu'à ce qu'elles présentassent une résistance égale à celle de la colonne liquide, ce qui avait lieu quand l'aiguille demeurait à 0° au moment où le circuit entier était fermé. M. Hankel avait soin de ne faire passer le courant chaque fois que pendant un instant très-court, de manière à empêcher que la polarisation des électrodes, et l'élévation de la température résultant du passage du courant, n'apportassent des perturbations dans les résultats. Il a ainsi trouvé que la conductibilité d'une dissolution de sulfate de cuivre concentrée augmente, en étant chauffée de

0° à 83°, environ dans le rapport de 1 à 3,6; celle d'une dissolution concentrée de nitrate de cuivre, dans le rapport de 1 à 3,0; celle d'une dissolution concentrée de sulfate de zinc, dans le rapport de 1 à 5,7. Ces résultats sont notablement plus considérables que ceux obtenus par M. E. Becquerel, ainsi qu'il est facile de s'en assurer en multipliant ces derniers par 83, nombre des degrés entre lesquels M. Hankel a opéré. Cette différence tient probablement à ce que M. Hankel employait pour électrodes, au lieu de fils de platine, comme le faisait M. E. Becquerel, des lames de cuivre dans les dissolutions de cuivre, et de zinc dans celles de zinc; il en résultait que l'action de la chaleur influait sur l'intensité du courant transmis, non-seulement en augmentant la conductibilité du liquide, mais en facilitant, par la dissolution des lames dans ce liquide, le passage de l'électricité; l'effet était donc complexe, ce qui fait que les résultats de M. Becquerel représentent mieux l'influence spéciale de la température sur la conductibilité propre du liquide.

L'influence des électrodes, c'est-à-dire des métaux qui transmettent le courant dans le liquide, est en effet très-grande dans ces phénomènes; ainsi il suffit, comme je l'ai remarqué, de chauffer fortement un électrode de platine, sans élever d'une manière sensible la température du liquide, pour faciliter d'une manière très-notable la transmission d'un courant, et porter, par exemple, son intensité telle que l'accuse un galvanomètre, de 12° à 30°; mais ce qu'il y a d'assez curieux, c'est que ce résultat ne s'obtient qu'autant que celui des électrodes qu'on chauffe est le négatif; le réchauffement de l'électrode positif est sans influence. Cet effet tient, comme nous le verrons, à une action chimique facilitée par la chaleur qui détruit la polarisation de l'électrode, laquelle contribue à diminuer l'intensité du courant transmis.

M. Vorselmann de Heer, après avoir confirmé les résultats que j'avais obtenus, a montré qu'il suffit d'ébranler fortement l'électrode négatif pour faire monter un courant de 34° à 40°, tandis que l'ébranlement de l'électrode positif ne produit presque pas non plus de changement dans la force du courant. Ces effets, ainsi que l'a très-bien démontré M. Beetz, tiennent à ce

que, soit l'action de la chaleur, soit le simple ébranlement mécanique, détruisent dans certains cas la polarisation des électrodes, laquelle contribue à diminuer l'intensité du courant transmis. Nous reviendrons sur ce point important quand nous aurons étudié la cause de la polarisation des électrodes, qui est le dépôt sur leur surface des éléments provenant de la décomposition électro-chimique des liquides.

La chaleur exerce un autre genre d'influence sur la conductibilité des corps, c'est de rendre conducteurs, en les faisant passer à l'état liquide, une foule de corps composés qui, à l'état solide, étaient incapables de transmettre un courant, ou ne le transmettaient qu'imparfaitement. Cette découverte importante est de Faraday.

Voici la liste des principales substances qu'il a trouvées susceptibles de devenir conductrices, quand elles sont liquéfiées par la chaleur, d'isolantes qu'elles étaient à l'état solide.

1° La glace, soit l'eau congelée.

2° Parmi les oxydes, celui de potassium, le protoxyde de plomb et celui d'antimoine, l'oxyde de bismuth et le verre d'antimoine.

3° Les chlorures de potassium, de sodium, de barium, de de strontium, de magnésium, de manganèse, de zinc, de plomb, d'antimoine, d'argent et les protochlorures d'étain et de cuivre.

4° Les iodures de potassium, de zinc, de plomb, le protoiodure d'étain et le periodure de mercure.

5° Les sulfures de potassium, d'antimoine.

6° Le chlorate de potasse, plusieurs nitrates, sulfates, etc., etc.

Parmi les corps chez lesquels la fusion ignée ne développe pas le pouvoir conducteur, nous pouvons citer, outre le soufre, le phosphore, le camphre, etc., le periodure d'étain, les sulfures d'arsenic (orpiment et réaglar), etc. Le verre fondu devient conducteur, surtout le flintglass, quand il est poussé à une haute température.

Ce qu'il y a d'assez remarquable, c'est que le simple ramollissement d'un corps par la chaleur ne suffit pas, en général, sauf dans quelques cas exceptionnels, pour le rendre conduc-

teur; il faut qu'il devienne complètement liquide, ce qui prouverait que l'effet tient moins à l'élévation de température qu'à la liquéfaction du corps. C'est ce que M. Faraday a observé, en particulier avec le borate de plomb.

Il va sans dire que dans toutes ses expériences M. Faraday constate la conductibilité par la faculté que possède ou qu'acquiert un corps de transmettre un courant capable d'agir sur l'aiguille aimantée, ou d'opérer une décomposition. Nous verrons dans le paragraphe suivant que pour les conducteurs imparfaits, où la propagation de l'électricité a lieu lentement, le mode d'observation est différent.

Il est probable que cet effet de la chaleur tient à ce que la transmission du courant ne peut avoir lieu dans les corps composés qu'autant qu'ils sont en même temps décomposés, et que la décomposition elle-même ne peut s'effectuer qu'autant qu'ils sont liquides. Cependant Faraday croit avoir trouvé des corps tels, par exemple, que le periodure de mercure qui, isolants quand ils sont solides, deviennent conducteurs quand ils sont fondus, sans cependant éprouver, en apparence du moins, de décomposition sensible. Il a également trouvé que le sulfure d'argent et le fluorure de plomb, qui à la température ordinaire sont isolants, deviennent conducteurs par la seule élévation de la température, sans avoir besoin de passer à l'état liquide. Une fois fondus, ils conduisent l'électricité aussi bien que les métaux et ne paraissent pas éprouver de décomposition. Quand ils sont redevenus solides et qu'ils ont été ramenés à leur température primitive, ils sont de nouveau isolants, ce qui semble prouver que leur nature chimique n'a point été altérée par la chaleur. Le verre est au reste dans le même cas. Toutefois c'est encore une question controversée, et qui sera traitée dans le chapitre des décompositions électrochimiques, que de savoir si un corps composé peut conduire l'électricité, sinon en totalité, du moins en partie, à la façon des corps simples, sans éprouver de décomposition.

C'est là aussi que nous étudierons l'influence de l'eau qui, quoique très-peu conductrice elle-même, peut, dans certains cas, rendre conducteurs par son mélange avec eux, non-seule-

ment des corps solides qu'elle dissout, mais des liquides qui sont très-isolants, tels que le brome, l'iode fondu et le chlore liquéfié. Il y a évidemment dans cette action de l'eau comme dans celle de la liquéfaction ignée une facilité apportée à la décomposition électrochimique, et par conséquent un effet plus chimique que physique. Au reste, sans insister maintenant sur ce sujet, je puis en trouver une preuve dans l'observation que j'avais déjà faite en 1837, et que M. E. Becquerel a confirmée, comme nous l'avons vu plus haut, que le mercure, quoique liquide, perd par le réchauffement une partie notable de son pouvoir conducteur, contrairement à ce qui arrive à tous les liquides qui, au lieu d'être des corps simples, sont des substances composées.

Nous mentionnerons encore, avant de terminer, les résultats importants obtenus par M. Matteucci, qui a soumis à l'expérience un grand nombre de combinaisons qu'il a pu se procurer à l'état pur, et qui satisfaisaient à la double condition d'être anhydres et fusibles. Un voltamètre était mis dans le circuit principal, lequel se subdivisait en deux, l'un renfermant un second voltamètre semblable au premier, l'autre la substance composée à l'état de fusion ignée. Si l'indication du second voltamètre était la même que celle du premier, c'était une preuve que la substance fondue n'était point conductrice; si au contraire cette indication était moindre ou nulle, on en pouvait conclure qu'une partie ou la totalité du courant passait à travers le corps soumis à l'expérience. C'est par ce procédé que M. Matteucci avait obtenu les résultats que nous avons rapportés plus haut sur les pouvoirs conducteurs des acides à divers degrés de concentration. A l'état de fusion, le protoxyde et l'iodure de plomb, le chlorure d'argent, le protochlorure de cuivre, les sulfures d'antimoine et de potassium, les nitrates de potasse et d'argent conduisaient tout le courant et n'en laissaient point passer à travers le voltamètre; venaient ensuite dans l'ordre de leur conductibilité, le chlorure de plomb, l'iodure de potassium, les chlorures de sodium, de calcium et de zinc, le biiodure et le protochlorure de mercure, le chlorure d'antimoine et le protochlorure d'étain. Les bichlorures d'étain et d'antimoine

obligeaient le courant à passer en entier dans le voltamètre secondaire. On a comparé ensuite des solutions aqueuses aussi concentrées que possible de ces combinaisons avec chacune d'elles à l'état de fusion ignée, et on a trouvé que tout le courant passe dans la combinaison fondue, lors même qu'on réchauffe la dissolution. Cependant il y a un rapport très-évident entre la conductibilité d'une solution et celle que possède le corps dissous quand il est à l'état de fusion; ainsi, pour que deux solutions aqueuses aient la même conductibilité, il est nécessaire que celle dont le composé à l'état de fusion est moins conducteur soit plus concentrée. Cette conséquence semble bien prouver que dans les solutions aqueuses de certains corps composés, dont la conductibilité à l'état de fusion est grande, le courant est conduit par le corps dissous, et que l'eau ne fait, comme la chaleur, que de lui donner l'état liquide nécessaire à la décomposition électro-chimique.

Une observation encore assez importante de M. Matteucci, c'est que certains corps qui ne conduisent pas à l'état de fusion, tels que les bichlorures que nous avons mentionnés plus haut, acquièrent cette propriété quand ils sont dissous dans l'eau, probablement parce que la présence de l'eau facilite leur décomposition; de même les chlorures d'antimoine et le protochlorure d'étain, qui sont très-peu conducteurs à l'état de fusion ignée, le sont beaucoup plus quand ils forment dans l'eau des dissolutions très-concentrées. Il est évident qu'il y a dans tous ces phénomènes des actions secondaires chimiques que le passage du courant détermine et facilite, ce qui fait que ces effets sont très-complexes.

Nous pouvons donc résumer ce paragraphe en disant, 1° que les métaux et le charbon ont une conductibilité propre qui varie avec leur nature et avec leur état moléculaire; 2° que l'élévation de température diminue chez tous leur pouvoir conducteur dans une proportion qui est variable pour chacun d'eux avec leur nature et leur état moléculaire; 3° que des corps composés solides, qui sont isolants à la température ordinaire, deviennent conducteurs en étant chauffés, mais que le plus grand nombre n'acquiert cette propriété que lorsqu'ils

sont assez chauffés pour passer à l'état liquide; 4° que pour les dissolutions aqueuses, le pouvoir conducteur varie avec leur degré de concentration, les plus concentrées étant ordinairement, sauf dans quelques cas exceptionnels, les plus conductrices, et que ce pouvoir augmente généralement avec l'élévation de la température; 5° que les différences qui existent entre les corps simples et les corps composés, quant à l'influence de la chaleur, semblent indiquer que leur conductibilité ou, ce qui revient au même, leur mode de propager l'électricité n'y est point complétement identique, ce qui tient probablement à ce que dans les corps composés la transmission du courant électrique y est toujours accompagnée ou d'un changement moléculaire, ou le plus souvent, sinon toujours, d'une décomposition chimique; 6° il résulte de cette dernière circonstance que le sujet de la conductibilité électrique des corps composés ne peut être traité complétement qu'en faisant l'étude des décompositions électro-chimiques qui forment l'objet d'un chapitre de cette quatrième partie.

§ 4. Propagation de l'électricité dans les conducteurs imparfaits solides et liquides.

Quand nous avons donné dans la première partie de ce traité la liste des corps conducteurs et isolants[1], nous avons eu soin de remarquer que la conductibilité n'est pas une propriété absolue, c'est-à-dire qu'on ne peut pas classer les corps en deux catégories dont les uns soient des conducteurs parfaits et d'autres des isolants parfaits. Nous nous sommes occupés dans le paragraphe précédent de ceux qui sont assez bons conducteurs pour pouvoir transmettre l'électricité voltaïque d'une manière continue et rapide, propriété qui est manifestée par les effets dynamiques du courant. Nous allons maintenant étudier dans ce paragraphe la propagation de l'électricité dans des corps dont plusieurs sont considérés comme isolants, ou qui, du moins, conduisent l'électricité trop imparfaitement pour pou-

[1] Tome Ier, page 7.

voir, sauf dans des circonstances exceptionnelles, transmettre un courant proprement dit.

Priestley avait déjà remarqué que la glace, le verre quand il est chaud ou quand il est pilé, la flamme d'une chandelle et un grand nombre de substances minérales, peuvent transmettre la décharge d'une bouteille de Leyde ou même celle du conducteur chargé d'une machine électrique. Coulomb, dans ses admirables travaux sur la déperdition lente de l'électricité, s'était assuré que des cylindres faits de substances en apparence les plus isolantes, telles que le verre, la cire d'Espagne et la gomme laque elle-même, transmettent difficilement il est vrai, mais d'une manière sensible, l'électricité accumulée sur le conducteur d'une machine électrique avec lequel on les met en contact par une de leurs extrémités. C'est ce dont on s'assure soit par la perte d'électricité qu'éprouve le conducteur, soit par l'action électrique que deviennent capables d'exercer ces substances isolantes, ce qui prouve qu'elles se sont imprégnées d'électricité. Cependant Coulomb trouve que lorsque l'intensité de l'électricité n'est pas très-forte, un fil de gomme laque d'un millimètre de diamètre et de 50 de longueur environ suffit pour isoler complétement une balle de sureau de 12 à 15 millimètres de diamètre. Mais comme on le voit, cette propriété isolante n'est pas absolue; car Coulomb a lui-même observé que le degré de réaction électrique auquel des supports cylindriques très-fins commencent à isoler est, pour un même état de l'air, proportionnel à la racine carrée de leur longueur. Pour connaître la perméabilité de toutes les substances qui transmettent imparfaitement l'électricité, il faut déterminer l'intensité de la réaction électrique à laquelle l'isolement commence pour des fils de même longueur et de même diamètre, mais de nature différente. C'est ainsi que Coulomb a trouvé que la valeur de cette réaction est dix fois plus forte pour un fil de gomme laque que pour un fil de soie.

Riess a soumis à l'expérience un certain nombre de substances pour savoir si elles sont conductrices ou non; il nomme conducteur un corps qui enlève instantanément l'électricité à un électroscope chargé avec lequel on le met en contact; conducteur

imparfait celui qui ne l'enlève que dans l'intervalle de quelques secondes; et non conducteur, celui qui, au bout de quelques minutes, n'a pas modifié d'une manière sensible la divergence des feuilles d'or de l'instrument; cette dernière distinction est un peu arbitraire. Il a trouvé ainsi qu'un cylindre de sélénium de 8 à 9 millimètres de diamètre et de 15 à 30 de longueur enlevait instantanément l'électricité d'un électroscope avec lequel il était mis en contact, mais que tiré en un fil fin à la flamme, il était aussi isolant qu'un fil de gomme laque; le sélénium appartient donc aux corps non conducteurs, et le frottement le rend facilement électrique, pourvu que la surface en soit bien propre. L'iode est un conducteur imparfait; des cylindres de 15 millimètres de diamètre et de diverses longueurs déchargent un électroscope dans une seconde, mais ne peuvent transmettre un courant voltaïque. De l'aluminium et du béryllium en poudre tassés dans des tubes de verre, terminés par des pointes métalliques, enlèvent très-promptement l'électricité à l'électroscope; mais Riess s'est assuré que ces deux substances ne doivent cette propriété qu'à la présence de l'eau condensée, car en les faisant sécher dans des creusets de porcelaine pendant une demi-heure sous la température de 100°, elles deviennent non conductrices. Le béryllium est même tellement isolant qu'une couche de moins d'un millimètre d'épaisseur ne change point la divergence de l'électroscope; avec l'aluminium, il faut, pour obtenir le même résultat, que la couche ait au moins 5 millimètres d'épaisseur [1].

Cette dernière observation montre combien il est difficile, quand il s'agit de corps qui ne sont que des conducteurs imparfaits, de se mettre à l'abri des causes diverses qui peuvent conduire à des résultats erronés. M. Karsten en signale une de nature à expliquer aussi les conclusions contradictoires auxquelles sont arrivés un grand nombre de physiciens qui se sont

[1] Il est probable que l'aluminium, auquel on est parvenu dernièrement à donner la consistance des métaux ordinaires et en particulier celle de l'argent, est un très-bon conducteur comme les autres métaux, et que c'est à l'état particulier dans lequel il se trouvait dans les expériences de M. Riess, qu'était due sa conductibilité imparfaite.

occupés de ce sujet, c'est la manière différente de préparer les corps soumis à l'expérience. Ainsi ayant voulu déterminer le pouvoir conducteur des différents sulfures métalliques, il a remarqué que le sulfure d'antimoine à l'état de poudre est un conducteur parfait, tandis que lorsqu'on l'a fondu et coulé dans un moule, il devient isolant; il est vrai qu'il se couvre alors d'une couche vitrifiée qui enveloppe un noyau cristallin, tandis que, lorsque le refroidissement a lieu très-lentement, toute la masse prend la texture cristalline et se comporte en conducteur. Mais, d'un autre côté, le sulfure d'antimoine produit par la voie humide est un parfait isolant. Il en est de même des sulfures de cadmium et de zinc; mais préparés par la voie sèche, ils sont conducteurs. Le sulfure d'étain, de cuivre, de plomb, de bismuth et de fer sont toujours conducteurs de quelque manière qu'ils soient préparés; le sulfure noir de mercure est un bon conducteur, tandis que le cinabre conduit très-faiblement; enfin les sulfures d'or et d'argent préparés par la voie humide sont conducteurs.

Il existe également des liquides qui, quoique considérés comme isolants, ne sont cependant en fait que des conducteurs imparfaits : tels sont, par exemple, les différentes espèces d'huiles, qui présentent entre elles à cet égard des différences très-remarquables. M. Rousseau, qui a le premier observé ces différences, s'est servi dans ce but d'un appareil de son invention, qui consiste dans une aiguille horizontale mobile sur un pivot au moyen duquel elle peut communiquer avec un des pôles d'une pile sèche, tandis que l'une de ses extrémités est très-rapprochée d'une boule fixe qui communique aussi avec le même pôle [1]. Si la communication est établie par un corps plus ou moins conducteur, l'aiguille est chassée de sa position normale; après avoir exécuté quelques oscillations, elle prend une position d'équilibre qui dépend de la force de la pile, laquelle

[1] M. Rousseau se sert, comme aiguille mobile, d'une aiguille aimantée, afin qu'elle revienne toujours à la même position quand il n'y a pas d'action; mais une aiguille non aimantée, de cuivre, atteint aussi bien le but et donne un résultat plus sensible.

peut être considérée comme constante pendant longtemps pour une même pile. Maintenant, pour employer cet appareil à la recherche des divers degrés de conductibilité, il suffit de placer dans le trajet que doit parcourir le fluide électrique les divers corps que l'on veut soumettre à l'expérience, avec la précaution de rendre toujours égale l'épaisseur que l'électricité en doit traverser : si l'écoulement de la quantité d'électricité nécessaire pour produire la plus grande déviation n'est pas instantané, le temps que l'aiguille mettra pour parvenir à sa position stable pourra être pris pour la mesure du degré de conductibilité de la substance composée. Pour soumettre les liquides à ce genre d'épreuve, M. Rousseau les place dans de petits vases métalliques qui communiquent par leur pied avec l'aiguille et la boule, puis il plonge dans le liquide une des extrémités d'un fil métallique recouvert en partie de gomme laque, afin que la même surface de métal soit toujours en contact avec le liquide; il mesure ensuite la durée du mouvement de l'aiguille, à partir du moment où la communication est établie par l'autre extrémité du fil avec l'un des pôles de la pile, pendant que l'autre pôle communique avec le sol.

En opérant avec différentes huiles, M. Rousseau a observé un fait très-curieux, c'est que l'huile d'olive possède une conductibilité très-inférieure à celle de toutes les autres huiles végétales ou animales. Ainsi pour produire une certaine déviation, tout étant semblable de part et d'autre, il fallait 40′ à l'huile d'olive et seulement 27″ à l'huile de pavot. Il suffit d'ajouter à l'huile d'olive un centième seulement d'une autre espèce d'huile pour réduire de 40 à 10′ le temps nécessaire à la production du même effet. Les graisses solides conduisent moins bien que les huiles animales, ce qui tient, ainsi qu'on s'en est assuré directement, à la proportion de stéarine plus grande dans les premières que dans les secondes. M. Rousseau n'a pu apercevoir aucune différence dans la propriété conductrice des liquides spiritueux, aqueux, acides, alcalins ou neutres, ce qui tient à ce qu'avec ces diverses substances, le temps que met l'aiguille à atteindre son maximum de déviation est trop court pour qu'on puisse reconnaître des inégalités de durée. Mais ces inégalités

sont très-sensibles quand on soumet à cette épreuve la résine, la gomme laque, le soufre, substances qu'on trouve toutes bien plus isolantes que la soie, le cristal et le verre ordinaire. Il serait facile de modifier l'appareil de M. Rousseau de manière à le rendre susceptible d'indiquer des différences entre les corps qui sont moins distants les uns des autres, sous le rapport de la conductibilité; mais en tout cas il ne donnerait que l'ordre du pouvoir conducteur plus ou moins imparfait des corps, et jamais leurs rapports de conductibilité.

Avant de poursuivre l'exposition des travaux faits sur le degré plus ou moins grand de conductibilité des conducteurs imparfaits, occupons-nous quelques instants de la manière dont s'y fait la propagation de l'électricité. Nous avons déjà exposé[1] les expériences et les théories de M. Faraday sur ce sujet, à l'occasion de ses travaux sur les corps diélectriques, ainsi que les recherches de Harris et de Matteucci. L'idée fondamentale de Faraday est que la propagation de l'électricité se fait dans les corps plus ou moins isolants par la polarisation des molécules successives, et que chaque corps possède, à cet égard, un pouvoir spécifique qui lui est propre. Matteucci avait déjà confirmé cette théorie par son expérience remarquable des lames de mica superposées qui se trouvent polarisées, c'est-à-dire avoir sur chacune de leurs faces une électricité différente, quand elles sont interposées entre deux armures fortement chargées d'électricités contraires; mais il a de plus démontré par des expériences directes que l'électrisation moléculaire se développe à un degré différent dans les divers corps isolants. Ainsi il a fait osciller un petit pendule, auquel il avait donné des charges électriques plus ou moins fortes, devant trois sphères d'un diamètre très-grand en comparaison de celui de la boule électrisée. Les trois sphères, placées successivement à une même distance du pendule électrisé (une fois à 100 millimètres, une seconde fois à 120), étaient une sphère de plomb, une sphère de soufre, une sphère de résine. La durée de 20 oscillations à 100 millimètres de

[1] Tome I, pages 135 et suivantes.

distance a été en moyenne, avec une certaine intensité électrique, pour la sphère de plomb de 24″ ½, pour celle de soufre de 30″ ½, pour celle de résine de 32″ ½; avec une autre intensité électrique et pour une distance de 120 millimètres, ces nombres ont été différents, mais leurs rapports sont restés à peu près les mêmes, ce qui donne pour la moyenne des nombres qui représentent les rapports des forces :

Sphère de plomb.	1
Sphère de soufre.	0.6072
Sphère de résine.	0.4800

Ainsi, à distance, des sphères de nature différente éprouvent, de l'électricité du pendule, une influence différente, mais indépendante quant à son intensité relative, de l'énergie de la charge électrique.

Au contact, ces différences sont plus sensibles. Pour les estimer, M. Matteucci se sert de lames et de cylindres faits de diverses substances isolantes, qu'il touche successivement avec une boule métallique électrisée, tenue par un manche isolant ou avec un cylindre de gomme laque électrisé par frottement; puis il porte la lame ou le cylindre qui ont été touchés en face d'un petit pendule électrique. Si le corps qui a électrisé est isolant, le point touché de la lame ou du cylindre se trouve chargé d'électricité contraire à celle du corps électrisé, et autour de ce point d'électricité semblable. Si le corps qui a électrisé est conducteur, la lame ou le cylindre isolant se trouvent bientôt chargés de la même électricité que ce corps, à moins que la substance isolante n'ait une grande masse, et que le contact n'ait duré qu'un instant très-court, dans quel cas les points touchés ont une électricité contraire à celle du conducteur électrisé.

Au reste, il est facile de prouver par l'expérience directe la propagation de l'électricité dans un corps isolant. Il n'y a pour cela qu'à électriser avec le conducteur de la machine un cylindre d'acide stéarique : si on le frotte avec un drap de laine, on a des signes d'électricité négative; mais il suffit de fondre sa surface ou de la laver dans de l'éther sulfurique, pour voir re-

paraître les signes de l'électricité positive que la machine électrique lui avait communiquée et qui s'était propagée dans son intérieur.

Les lois de cette propagation ont été l'objet de recherches longues et délicates de la part de M. Matteucci. C'est en opérant avec la balance de Coulomb, et en introduisant, après que la boule mobile s'était écartée d'environ 30° de la fixe, une lame isolante qu'il mettait en contact avec cette boule, qu'il jugeait, par la diminution de l'écartement des deux boules, de la facilité avec laquelle la lame isolante avait enlevé de l'électricité à la fixe, et par conséquent de son degré d'aptitude à propager l'électricité. Il avait soin de laisser durer le contact pendant cinq minutes dans chaque expérience, et il appréciait par la diminution de l'angle de torsion, après que la lame isolante avait été enlevée, la quantité d'électricité qu'elle avait prise à la boule fixe. Les expériences ont été faites en variant la charge initiale de la boule, l'étendue et l'épaisseur de la lame isolante, et en opérant essentiellement avec des lames de soufre, quelquefois aussi avec des lames de gomme laque, de verre et de mica. Dans chaque expérience on a noté la force électrique initiale, la force électrique pendant le contact de la lame isolante, et enfin la force *résiduelle*, c'est-à-dire qui avait persisté après cinq minutes de contact : pendant ces cinq minutes la perte de l'électricité par l'air était absolument insensible.

Les résultats des nombreuses expériences faites de cette manière par M. Matteucci ne conduisent pas à des lois bien simples, mais les conclusions n'en sont pas moins curieuses. Ainsi la quantité d'électricité prise à la boule par la substance isolante est proportionnellement d'autant plus grande que la charge électrique est plus forte; elle est également d'autant plus considérable que la lame isolante est plus mince et moins étendue; ce qui tient à ce que l'effet est concentré sur un moins grand nombre de points et par conséquent proportionnellement plus fort. Il en résulte que le passage de l'électricité d'une boule métallique à un corps isolant a lieu d'autant plus facilement que celui-ci est plus mince, et présente à la boule le moindre nombre de points qui ne la touchent pas, de sorte qu'une boule métal-

lique électrisée perdrait la moindre quantité d'électricité possible dans le cas où elle serait posée sur une lame isolante très-épaisse et très-étendue, et qu'au contraire, la plus grande perte d'électricité aurait lieu en réduisant le corps isolant à une tige très-mince et très-courte [1].

Si les lames isolantes, quelle que soit leur nature, sont recouvertes d'une même feuille d'étain sur une de leurs faces, pendant que l'autre est en contact avec la boule mobile électrisée, on trouve que la force électrique de la boule diminue beaucoup plus, soit pendant, soit après ce contact, que lorsque la lame isolante n'est pas armée; ces résultats semblent démontrer la pénétration des charges électriques contraires qui se trouvent sur les deux faces de la lame isolante, l'une par contact, l'autre par influence, pénétration qu'il est facile de prouver directement. Pour cela il n'y a qu'à prendre un morceau cubique de sperma-ceti et le placer entre deux armures pour faire un tableau magique qu'on charge faiblement, mais longtemps. Puis, au moyen de lames de verre, on partage la pièce de sperma-ceti en plusieurs fragments qu'on trouve chargés jusqu'à une certaine profondeur d'électricité positive du côté de l'armure positive, et d'électricité négative du côté de l'armure négative. Si l'on remplace le sperma-ceti par des lames de mica appliquées les unes sur les autres, au lieu d'avoir des états électriques contraires sur les faces opposées de chacunes d'elles, on finit, pourvu qu'on emploie une forte électricité agissant longtemps, par trouver la même électricité sur les deux faces d'une même lame, en allant des lames extérieures vers le milieu, savoir, l'électricité positive sur les lames qui sont d'un côté, la négative sur celles qui sont de l'autre.

M. Matteucci estime, d'après ces expériences et d'autres que nous avons déjà rapportées [2], que les différences observées par Faraday et Harris, entre les diverses substances, quant à leur faculté de modifier la charge électrique du carreau magique

[1] Ce résultat est d'accord avec l'observation de Coulomb, que pour produire un isolant c'est parfait; une tige mince doit être d'autant plus longue que la substance dont elle est faite est moins isolante.

[2] Tome I, page 148.

entre les deux armures duquel elles sont placées, ne tiennent pas à leur pouvoir spécifique inducteur, mais simplement à des différences dans la propagation de l'électricité, soit à leur surface, soit à une très-petite profondeur dans leur intérieur; preuve que les états électriques moléculaires peuvent se détruire dans les corps isolants, et l'électricité s'y propager comme dans les conducteurs, et que le pouvoir isolant ne consiste que dans la résistance plus ou moins grande à l'établissement et à la destruction successive des états électriques moléculaires. Remarquons aussi que cette électrisation moléculaire se développe et cesse dans les corps isolants au moment même où la présence du corps électrisé commence ou cesse.

Un fait assez remarquable, c'est que l'électricité négative se propage plus facilement que la positive, soit sur la surface, soit à l'intérieur des corps isolants. L'expérience se fait en chargeant les boules, tantôt d'électricité négative, tantôt d'électricité positive, et en comparant les résultats obtenus en mettant chaque fois la boule mobile en contact avec la face non armée de la lame isolante, la face armée étant en communication avec le sol. Les différences sont très-prononcées : la diminution de la force électrique pendant le contact, et de la force qui reste après le contact, est plus grande pour l'électricité négative que pour la positive, dans le rapport du double au simple. La différence est moins grande, quoique toujours sensible, quand les lames isolantes ne sont pas armées, mais elle est d'autant plus considérable que la charge électrique est plus forte. Il est évident que c'est dans cette propriété différente des deux électricités que se trouve la cause des figures de Lichtenberg[1], dans lesquelles l'électricité positive se propage sur une face isolante en ramifications, par conséquent en filets resserrés et distribués inégalement sur cette surface, tandis que la négative se propage uniformément en rayons également distribués autour du point électrisé.

Ajoutons encore que les différences de température, même les plus légères, font varier considérablement le pouvoir isolant

[1] Tome I, page 108.

des corps, mais ces variations ne suivent pas les mêmes progressions dans les différentes substances. Ainsi, avec des charges électriques assez fortes, le soufre est jusqu'à 20° moins isolant que la gomme laque; c'est l'inverse au delà de 20°. Pour déterminer exactement la différence dans les deux cas, on prend deux cubes de 6 centimètres de côté, l'un de soufre, l'autre de gomme laque; chacun de ces cubes est coupé par le milieu, et on y pratique au centre une cavité sphérique de la grandeur de la boule mobile qui s'y trouve logée comme dans un moule. Les cubes étant bien desséchés, on y met la boule pendant quelques moments; on trouve que la perte d'électricité étant à 13°, 8, $\frac{1}{337}$ dans l'air, elle est $\frac{1}{87}$ dans la gomme laque, et $\frac{1}{81}$ dans le soufre, et à 35°, $\frac{1}{21}$ dans la gomme laque, et $\frac{1}{40}$ dans le soufre.

Il ne faut pas confondre cette influence de la chaleur avec celle qui consiste à enlever de la surface de quelques corps, tels que le verre et le mica, une mince couche d'humidité qui les rendait un peu conducteurs. Dans ce cas, l'élévation de la température augmente leur pouvoir isolant. Mais un réchauffement plus fort le diminue; le verre, la résine, la cire, deviennent conducteurs à une température suffisante pour les amollir et encore plus quand ils ont été amenés à l'état liquide. Le verre, à l'état de fusion, peut même conduire un courant très-faible de façon à agir sur le galvanomètre. Il est vrai que dans ces conditions-là, il éprouve probablement une altération dans sa constitution chimique, ce qui peut expliquer les modifications apportées à son pouvoir isolant; c'est ce qui arrive également quand sa surface a été rayée par des décharges électriques: on remarque, en effet, que les raies sont beaucoup plus conductrices que le reste de la surface qui n'a pas été altérée par le passage des décharges. Toutefois une simple modification dans la disposition des particules suffit bien sans altération chimique pour expliquer les changements que peut éprouver la conductibilité des corps qui sont des conducteurs imparfaits, et nous en trouvons une preuve remarquable dans les propriétés conductrices des cristaux, qui ont été étudiées avec beaucoup de soin successivement par M. Wiedemann et par M. de Sénarmont.

Le premier de ces physiciens s'est servi pour cette étude de poudre de lycopode ou de minium dont il saupoudre la surface du corps soumis à l'expérience; puis il touche un point de cette surface avec la pointe d'une aiguille isolée, par laquelle il fait arriver l'électricité positive d'une bouteille de Leyde. La poudre légère se disperse tout autour de la pointe par l'effet de la répulsion exercée sur elle par les points de la surface qui ont reçu l'électricité. Lorsque le corps saupoudré est une plaque de verre, on obtient autour de la pointe une figure circulaire traversée par des rayons semblables aux figures de Lichtenberg. Quand on remplace le verre par une paillette de gypse, la poudre ne se disperse plus d'une manière uniforme dans toutes les directions. On remarque deux directions principales diamétralement opposées suivant lesquelles la dispersion a lieu avec plus de force; il en résulte une surface elliptique dont les axes sont entre eux comme 2 ou 3 est à 1. Le grand axe de cette ellipse forme un angle droit avec l'axe cristallographique principal, ce qui prouve que l'électricité se distribue plus facilement dans une direction perpendiculaire à l'axe principal que dans toute autre. Le même phénomène se présente avec plusieurs autres cristaux, tels que la célestine, le quartz, les acétates de chaux et de cuivre, qui sont tous positifs. Par contre, sur les substances cristallines négatives, telles que l'arragonite, la tourmaline et les spaths d'Islande, l'axe de l'ellipse formée par la dispersion électrique de la poudre est parallèle à l'axe cristallographique. Ces résultats opposés semblent indiquer que la direction de la meilleure conductibilité électrique est aussi celle dans laquelle la lumière se propage relativement le plus vite.

M. de Sénarmont, qui avait déjà découvert l'inégale conductibilité des cristaux pour la chaleur dans différentes directions, était arrivé en même temps que M. Wiedemann [1] à des résultats analogues en ce qui concerne le pouvoir conducteur pour l'électricité. M. de Sénarmont recouvre la surface des corps mauvais conducteurs d'une feuille d'étain formant autour de

[1] Les recherches de M. Wiedemann ont paru peu de temps avant celles de M. de Sénarmont, mais les procédés des deux savants, quoique leurs résultats s'accordent en général, sont très-différents.

ce corps comme une enveloppe métallique; il a soin de ménager dans cette enveloppe un trou parfaitement circulaire, qui laisse à nu une partie de la surface naturelle. Une pointe métallique isolée placée au centre de l'ouverture, perpendiculairement à la surface même du corps mauvais conducteur, est la voie par laquelle arrive l'électricité. Celle-ci ne peut s'écouler qu'en cheminant vers la circonférence et en franchissant un espace non conducteur; elle a donc à surmonter des résistances qui se manifestent par des phénomènes lumineux. Comme tout est symétrique, l'électricité arrivant au centre du cercle est sollicitée également de tous côtés par la circonférence conductrice, et ne peut être dirigée en plus forte proportion dans un sens ou dans l'autre que par des différences de conductibilité superficielle. Il est avantageux d'opérer dans l'air raréfié, parce que le phénomène s'y régularise beaucoup; il est vrai que le flux continu de l'électricité ne laisse pas dans ce cas de traces permanentes, mais il se manifeste dans l'obscurité par une lueur qui rend visibles toutes les particularités du phénomène pendant sa durée.

Les expériences ainsi conduites montrent que sur les matières homogènes, ou sur des cristaux du système régulier, l'électricité s'épanouit circulairement autour de la pointe centrale et couvre la surface du cercle d'une lueur uniforme; il en est de même pour les cristaux du système prismatique à base carrée et rhomboédrique, mais seulement quand la face est normale à l'axe de symétrie. Dans tous les autres cas, c'est-à-dire sur les faces parallèles et inclinées à l'axe de symétrie des cristaux de ce système sur une face quelconque, ainsi que pour des cristaux des autres systèmes, il existe une direction de conductibilité principale. On voit en effet alors la lueur s'échapper librement du centre dans deux directions opposées, et former ainsi un diamètre lumineux qui s'oriente dans une direction fixe ou s'épanouit un peu en éventail, et se balance par quelques oscillations légères à droite et à gauche de sa véritable direction. L'orientation est plus stable quand on laisse à l'air une certaine tension; quelquefois même, dans ce cas, des étincelles brillantes et instantanées viennent se mêler à la lueur violacée

permanente, et si l'on a saupoudré la surface de fleur de soufre, les étincelles laissent sur cette poussière la trace du trajet rectiligne qu'elles ont parcouru.

Les résultats obtenus par M. de Sénarmont montrent que quand la face du cristal contient dans son plan un ou deux axes de symétrie, la direction de conductibilité maximum est perpendiculaire ou parallèle à ces axes, mais que dans les autres cas, c'est-à-dire quand la face ne contient pas d'axes de symétrie dans son plan, cette direction ne peut être prévue *à priori;* elle doit être déterminée par l'expérience, et ne coïncide nécessairement ni avec les directions des axes d'élasticité optique, ni avec les directions des axes de conductibilité thermique. Toutefois, les analogies que présentent les propriétés optiques, calorifiques, magnétiques et électriques des cristaux, que nous avons déjà fait ressortir précédemment [1], et l'influence qu'exercent sur ces propriétés les axes de symétrie égaux ou inégaux sont de nature à démontrer qu'elles se rattachent à une cause commune, savoir, l'arrangement moléculaire, et à faire sentir l'importance de cette cause dans les phénomènes qui nous occupent. M. Knoblauch a, en effet, démontré de son côté l'influence de la forme cristalline sur l'électricité induite, en observant que les cristaux suspendus entre les pôles contraires de deux piles sèches y prennent une direction déterminée qui tient au mode de groupement de leurs particules.

Ajoutons encore que M. de Sénarmont, comme M. Wiedemann, a remarqué une différence très-prononcée entre l'électricité positive et la négative, quant à leur mode d'action dans les expériences relatives à la conductibilité superficielle des cristaux. Les résultats sont toujours très-confus et variables quand on fait arriver par la pointe l'électricité négative; ils ne sont bien déterminés qu'avec la positive. Nous reviendrons sur ces différences que présentent les deux électricités, mais auparavant nous devons en signaler une qui n'était qu'apparente et qu'on est parvenu à expliquer par les effets ordinaires et connus du courant électrique.

[1] Tome I, page 512.

Ermann avait cru trouver dans une classe particulière de conducteurs imparfaits, qu'il avait appelés *unipolaires*, la propriété de transmettre plus facilement l'une des électricités que l'autre. Il introduisait dans un morceau de savon bien sec deux fils de métal communiquant chacun avec l'un des pôles d'une pile voltaïque; les deux pôles conservaient leur tension, mais si l'on touchait le savon avec un corps conducteur, le pôle négatif se déchargeait, tandis que le pôle positif acquérait le maximum de tension qu'il possède quand, la pile étant isolée, on fait communiquer le pôle négatif avec le sol. Ermann avait trouvé la même propriété dans le blanc d'œuf desséché et dans la flamme du phosphore; il l'avait également remarquée dans les flammes d'hydrogène, d'alcool et des corps hydro-carbonés en général, mais avec cette différence que c'est le pôle positif qui se décharge avec ces flammes, tandis que le pôle négatif acquiert sa plus forte tension. On avait en conséquence nommé les premiers corps unipolaires négatifs, et les seconds unipolaires positifs. Cette classification, outre ce qu'elle présentait de trop absolu, avait le défaut d'être basée sur une interprétation erronée des expériences. En effet, Ohm a montré que la cause du phénomène observé par Ermann ne réside point dans une propriété de la substance interposée entre les pôles de la pile, mais qu'il tient à l'effet qu'y produit, dès que le circuit est fermé, le courant qui la traverse. Cet effet consiste dans la décomposition du savon, dont l'acide stéarique ou oléique se porte au pôle positif, tandis que la soude va au négatif; ces acides étant d'une nature isolante, dès qu'ils ont recouvert le fil sur lequel ils se déposent, l'électricité du pôle auquel ce fil communique, c'est-à-dire la positive, ne peut plus passer dans le savon, tandis que la négative continue à y être transmise et s'écoule de là dans le sol. Ainsi le pôle négatif de la pile est déchargé, tandis que le positif garde sa tension. Cette interprétation toute naturelle de l'expérience d'Ermann se trouve confirmée par un grand nombre de faits. Il suffit, en effet, de mettre en communication avec le pôle négatif le fil qui aboutissait au pôle positif, et qui par conséquent est recouvert de la couche d'acide, pour isoler l'électricité négative comme l'était auparavant la posi-

tive. Il faut, pour réussir dans ces expériences, avoir une pile énergique, car sans cela les produits de la décomposition sont en si petite quantité, qu'ils ne peuvent mettre obstacle à la circulation du courant.

Quant à l'unipolarité des flammes hydrogénées, il est probable qu'elle est due à la décomposition voltaïque de la vapeur d'eau formée dans la combustion, décomposition qui détermine sur la surface du fil négatif le dépôt d'une couche isolante d'hydrogène, d'où résulte que l'électricité positive peut seule s'écouler dans le sol au moyen du fil métallique placé dans la flamme. Nous reviendrons d'ailleurs sur ce qui concerne le pouvoir conducteur des flammes dans le paragraphe suivant, consacré à la propagation de l'électricité dans les fluides élastiques.

L'acide sulfurique concentré, placé dans les mêmes conditions que le savon et les flammes, est un conducteur unipolaire négatif, ce qui provient de la formation sur les fils positifs de sulfates insolubles et non conducteurs; mais l'effet varie avec la nature des fils immergés dans l'acide, vu que les uns forment des sulfates plus solubles et plus conducteurs que ceux que forment les autres. Au reste, toute cette classe de phénomènes n'est que le résultat des actions secondaires qui accompagnent toujours la transmission de l'électricité à travers les conducteurs susceptibles d'être décomposés, et à ce titre elle perd beaucoup de son importance théorique, et rentre dans la catégorie des faits nombreux qui tiennent à la même cause, et que nous étudierons dans le chapitre des décompositions électrochimiques [1].

[1] Nous n'avons pas fait mention, dans ce que nous venons de dire sur les conducteurs unipolaires, des expériences d'Ermann, relatives à l'action réciproque isolante et conductrice que le platine incandescent de la lampe aphlogistique de Davy exerce sur les deux électricités. Ces phénomènes, dans lesquels on avait cru d'abord trouver des preuves en faveur de la théorie de Franklin d'une seule électricité, sont très-complexes, et dépendent essentiellement de la production d'électricité qui accompagne la combustion lente qui a lieu dans la lampe aphlogistique. Aussi leur étude doit être nécessairement renvoyée au moment où nous nous occuperons des diverses sources de l'électricité.

Nous n'avons jusqu'ici parlé, en nous occupant des conducteurs imparfaits solides et liquides, que de la propagation lente et graduelle de l'électricité qui peut s'y opérer, mais ces conducteurs peuvent transmettre l'électricité suivant un mode tout différent, c'est-à-dire brusquement et instantanément. Ce mode de transmission est accompagné dans ces corps d'une rupture dans leur équilibre moléculaire, qui se présente sous différentes formes, mais qui a toujours lieu ; il est également accompagné souvent d'effets lumineux, calorifiques et chimiques, mais la production de ces effets n'est pas une condition nécessaire de la transmission de l'électricité ; aussi nous les étudierons plus loin dans les chapitres qui leur sont consacrés, tandis que les phénomènes moléculaires étant liés au mode même de propagation dont il s'agit, nous ne pouvons séparer leur étude de celle de ce mode de propagation.

Quand on place une lame mince de verre ou de mica entre les deux extrémités des tiges d'un excitateur, elle est, ainsi que nous l'avons déjà vu, percée d'un trou par la décharge d'une batterie électrique ; il en est de même d'un morceau de bois sec qui est fendu et brisé en plusieurs fragments qui sont dispersés tout autour. Les bords du trou, quand il s'agit de verre ou de mica, deviennent opaques ; on voit que l'état moléculaire de la substance y a été altéré. Si l'on place les deux extrémités des tiges de l'excitateur à quelque distance l'une de l'autre, mais du même côté, sur la surface d'une plaque de verre, la décharge s'opère au moyen d'une étincelle qui passe sur cette surface, en y laissant des traces ineffaçables de la route qu'elle a suivie. Sur du verre dur et sur le cristal de roche, ces traces sont pâles, d'un gris uni, résistent sous l'ongle parfaitement, comme si l'on eût altéré le poli de la surface en la frottant avec un sable grossier. Sur le verre mou, sur le mica et sur les cristaux tendres, les traces que laisse la décharge présentent un autre aspect ; elles semblent indiquer que la matière a éprouvé un changement chimique jusqu'à une certaine profondeur, changement qui donne naissance aux figures électriques observées par Riess et différents physiciens : ce changement chimique accompagne presque toujours l'effet mécanique, car les traces

que le verre le plus dur présente sur sa surface après la décharge sont légèrement alcalines, ainsi qu'il est facile de le constater en les frottant avec du papier rougi de tournesol.

Nous avons déjà cité l'expérience de la carte qui, lorsqu'elle a été percée par la décharge, présente des bavures des deux côtés, et dont le trou est toujours vis-à-vis de la pointe négative, quand ces deux pointes ne sont pas vis-à-vis l'une de l'autre, ce qui tient, comme nous le verrons, à l'inégale pression que les deux électricités éprouvent de la part de l'air.

Quand la décharge traverse les liquides, il y a toujours, s'ils sont des conducteurs imparfaits ou plutôt des isolants, tels que l'huile d'olive, l'éther sulfurique et l'essence de térébenthine, un effet mécanique accompagné d'une étincelle. Le vase qui renferme ces liquides est le plus souvent brisé par l'effet d'une décharge même modérée : ainsi, s'il est en bois, il peut être violemment renversé par une étincelle longue de un millimètre; pour qu'il soit brisé, il faut que l'étincelle soit un peu plus forte. Singer a réussi à briser en plusieurs fragments des tubes de verre dont les parois avaient plus d'un centimètre d'épaisseur, en faisant passer une décharge à travers une colonne liquide dont les tubes étaient remplis; il est vrai qu'on avait eu soin de fermer hermétiquement les extrémités par lesquelles on avait introduit les fils destinés à transmettre la décharge. Le même effet est produit quand le tube est rempli d'un liquide bon conducteur, comme du mercure, par exemple, ou de l'acide sulfurique; seulement il faut que le tube soit capillaire, et que la longueur de la colonne liquide ne soit pas trop considérable. Morgan a remarqué qu'avec l'acide sulfurique concentré et un tube capillaire de 2 millimètres de diamètre, la plus grande longueur à laquelle l'explosion *brisante* et *lumineuse* en même temps puisse avoir lieu, est de 50 centimètres environ.

Le passage des décharges à travers les liquides mauvais conducteurs, tels que les huiles et les essences, élève leur température et y produit un dépôt de charbon provenant de leur décomposition, qui finit par augmenter légèrement leur faculté conductrice. C'est probablement un effet de la haute température de l'étincelle plutôt que de l'électricité même; c'est ce que nous

chercherons à démontrer plus loin. Morgan, qui le premier avait observé ce fait, avait également remarqué que parmi les liquides, les huiles sont ceux qui laissent passer la décharge le moins facilement, tandis que l'alcool et l'eau surtout, quand elle est chauffée, la transmettent beaucoup mieux, au point que, dans ce dernier cas, elle n'est plus lumineuse.

Du reste, l'effet explosif de la décharge à travers les corps conducteurs a lieu également, qu'ils soient solides ou liquides comme le mercure. Ainsi, lorsque l'on place une feuille d'or très-mince entre deux plaques de verre, dont la supérieure est chargée de poids, l'or est réduit en poussière et les plaques sont souvent mises en pièces [1]. De même un fil de fer très-mince de 3 à 5 centimètres de longueur, traversé par une décharge qui le réduit en poussière, est capable de briser en mille fragments, qui sont projetés au loin, un tube de verre large d'un peu plus d'un centimètre dans l'intérieur duquel il est placé; il faut avoir soin de faire arriver la décharge par deux gros fils de métal introduits chacun par l'une des extrémités du tube et qui sont unis par le fil de fer. Si l'on a soin d'entourer ce fil d'un morceau de papier, le papier est déchiré, mais le verre n'est point endommagé. L'action est infiniment plus violente quand le fil est entouré d'eau ou d'huile, ce qui tient à ce que les liquides étant incompressibles, ou à peu près, transmettent d'une manière beaucoup plus complète et plus instantanée que l'air la pression qu'ils éprouvent. On peut fendre des canons de pistolets en les remplissant d'eau ou d'huile, et en ayant soin de placer dans le liquide une mince bande de plomb, que la décharge pulvérise.

Dans tous les cas où le corps qui est traversé par la décharge est métallique, il y a un grand développement de chaleur. Est-ce à une vaporisation subite, produite par cette chaleur, que les effets mécaniques que nous venons d'étudier peuvent être attribués? Cela serait possible quand il s'agit du mercure, mais cette interprétation du phénomène devient plus difficile

[1] Nous avons déjà cité cette expérience de la feuille d'or, mais sous une forme un peu différente. Voyez tome I, page 118.

pour l'or et surtout pour le fer. Il semblerait donc, qu'indépendamment de la chaleur qu'elle développe, la décharge produirait même, dans les corps très-conducteurs, quand elle y éprouve de la résistance, une rupture mécanique et comme une espèce d'expansion subite très-énergique. Cependant ce point mérite un examen très-attentif : nous le réservons pour le moment où nous nous occuperons des effets calorifiques des décharges, qui sont entièrement liés avec leurs effets mécaniques, comme Riess l'a si bien démontré.

En résumé, tous les phénomènes que présente la propagation, soit lente, soit instantanée, de l'électricité dans les conducteurs imparfaits, manifestent la liaison intime qui unit cette propagation avec l'état moléculaire des corps. Là où la propagation est lente, tout ce qui modifie l'état moléculaire influe sur elle, cristallisation, liquéfaction, simple élévation de température. Là où la propagation est instantanée, c'est l'état moléculaire qui est influencé par elle. Il est donc très-probable que la différence sensible qui existe à cet égard entre les bons conducteurs et les conducteurs imparfaits tient à ce que, dans ceux-ci, l'influence de la polarité des atomes, que nous avons établie précédemment, est beaucoup plus sensible. En effet, l'imperfection même de leur pouvoir conducteur fait que les électricités contraires produites à leurs pôles, c'est-à-dire aux extrémités de leur axe, ne peuvent pas se réunir par leur surface aussi facilement que chez ceux qui sont doués d'une bonne conductibilité; il en résulte un état polaire des particules qui les oblige de changer de position pour se disposer d'une manière harmonique avec les deux électricités entre lesquelles elles sont placées, tandis que les particules conductrices éprouvent seulement l'effet d'influence ou de polarisation artificielle, et non naturelle, que nous avons admise pour expliquer la manière dont l'électricité se propage dans les corps conducteurs. Nous verrons bien d'autres preuves de cette polarité préexistante des particules des corps non conducteurs, quand nous nous occuperons du dégagement d'électricité auquel ces corps donnent naissance par l'effet de l'élévation de la température.

§ 5. Propagation de l'électricité dans les fluides élastiques.

Les gaz, quand ils sont bien secs, et en particulier l'air atmosphérique, passent pour être des corps parfaitement isolants; cependant ils sont susceptibles de propager l'électricité plus ou moins facilement, il est vrai, suivant leur nature et suivant les conditions dans lesquelles ils se trouvent placés.

Coulomb avait déjà cherché à apprécier la perte d'électricité qu'éprouve un corps électrisé bien isolé par l'effet du contact de l'air. Il avait réussi à éliminer la cause de déperdition qui aurait pu provenir du support isolant, en employant pour isolateur un fil de gomme laque d'un millimètre de diamètre et de 40 à 50 de longueur, et en donnant au corps isolé, qui était une balle de moelle de sureau de 12 à 15 millimètres de diamètre, une électricité qui ne fût pas très-forte. Cette balle était placée à la balance de torsion vis-à-vis d'une balle mobile également bien isolée, puisque l'aiguille qui la portait était aussi un cylindre fin de gomme laque; cette balle mobile avait la même électricité. La perte d'électricité opérée par le contact de l'air devenait sensible par la diminution graduelle de la force répulsive des balles, qu'on appréciait par la diminution de la force de torsion nécessaire pour les maintenir à la même distance l'une de l'autre, à 20°, par exemple. Il était facile, avec une montre à secondes, de déterminer exactement le rapport existant entre une certaine diminution de force répulsive et le temps nécessaire pour que cette diminution eût lieu. En comparant cette diminution avec la force répulsive moyenne entre deux expériences consécutives, Coulomb trouvait une fraction qui exprimait la proportion de la force électrique des deux balles perdue pendant une minute, dans un certain moment. Dans les tableaux que Coulomb a donnés de ces résultats, on trouve que cette fraction varie de $\frac{1}{14}$ à $\frac{1}{60}$; on remarque également que, pour un même jour et un même état de l'air, l'affaiblissement de l'électricité dans un temps très-court est proportionnel à son intensité, et qu'il varie suivant une loi difficile à déterminer avec l'état

hygrométrique de l'air. La nature de la substance dont les balles sont faites ne paraît pas causer d'influence sur la déperdition de l'électricité par le contact de l'air. Il en est de même de la forme, pourvu qu'elle ne soit pas angulaire, cas dans lequel l'électricité, comme on le sait, s'échappe du corps d'une manière irrégulière. Coulomb ne trouvait pas non plus de différence entre les deux électricités, quant à l'intensité et aux lois de leur déperdition par le contact de l'air.

Faraday, dans ses recherches sur les corps diélectriques, partant, comme nous l'avons vu, du principe que la communication de l'électricité s'y fait par la polarisation des molécules successives, avait soumis à l'expérience divers gaz et l'air à différents états de densité, en faisant usage de l'appareil que nous avons décrit et qui est destiné [1] à déterminer le pouvoir inducteur spécifique des corps. C'est, comme on se le rappelle, deux véritables bouteilles de Leyde, parfaitement semblables, dans lesquelles les substances isolantes interposées entre les armures sont celles dont on veut comparer les pouvoirs inducteurs. Le savant physicien anglais, en opérant de cette manière, n'a pu apercevoir aucune différence sensible à cet égard entre les divers gaz et l'air plus ou moins raréfié et plus ou moins échauffé. Seulement il faut éviter, dans ces expériences, de pousser la tension électrique jusqu'au point où la décharge aurait lieu.

M. Matteucci a repris le sujet de la propagation de l'électricité dans les corps gazeux, et a réussi à en déterminer les lois par une nombreuse série d'expériences faites avec beaucoup de soin. Il s'est servi, pour la mesure des forces électriques, de plusieurs balances de Coulomb, munies de fils de torsion d'une longueur et d'un diamètre différents, suivant les forces électriques avec lesquelles il opérait. Au lieu d'employer, comme Coulomb, des boules de moelle de sureau, qui ont l'inconvénient de devenir un peu isolantes dans l'air très-sec, il a préféré faire usage de boules de même dimension, mais faites avec une lame très-mince d'argent doré. Du reste, les expériences étaient conduites de la même manière; seulement la

[1] Tome I, p. 131, fig. 67.

Digitized by Google

boule, fixée à la tige isolante qui agit sur la mobile, est retirée de la balance pour être placée dans diverses conditions qui influent dans un sens ou dans l'autre sur la déperdition de son électricité; puis elle est reportée à la balance au bout d'un temps, toujours le même, afin qu'on puisse déterminer la perte qu'elle a éprouvée. L'air de l'intérieur de la balance est aussi sec que possible, de sorte qu'on peut admettre que la perte éprouvée par la boule de la balance, dans dix minutes, est très-petite, et toujours la même pour toutes les expériences.

Voici les résultats auxquels a conduit ce mode d'expérimentation :

1° La perte de l'électricité par le contact de l'air n'est pas augmentée par l'agitation de l'air; au contraire, la perte de l'électricité dans l'air agité est moindre que celle qui a lieu dans l'air en repos. Ce résultat, singulier en apparence, s'explique facilement si on tient compte du temps qu'il faut probablement aux particules pour se polariser et transmettre ainsi l'électricité du corps avec lequel elles sont en contact.

2° La perte d'électricité qu'éprouve un corps, par le contact de l'air, est influencée par les corps qui sont en présence, et varie avec l'état électrique de ces corps. Ainsi la perte la plus petite a lieu quand le corps électrisé est en présence d'un corps qui possède une électricité contraire à la sienne; elle est plus considérable quand le corps en présence n'est pas électrisé et communique avec le sol, et surtout quand les deux corps ont la même électricité. Pour faire ces expériences, on place, pendant dix minutes, la boule électrisée qu'on retire de la balance, ou de manière qu'elle soit isolée dans l'air, ou en présence d'une sphère métallique isolée et chargée, tantôt de la même électricité, tantôt de l'électricité contraire, ou dans le centre d'une sphère métallique en communication avec le sol.

Voici le tableau des expériences faites de cette manière dans de l'air ayant la même température et le même degré d'humidité.

NOMBRE des expériences.	DISTANCE des boules.	TORSION du micromètre.	APRÈS dix minutes.	DISTANCE des boules.	TORSION du micromètre.
1	20°	188°	10m	20°	105°
2	20	188	10	20	136
3	20	188	10	20	96
4	20	188	10	20	164
5	20	188	10	20	85
6	20	188	10	20	162
7	20	198	10	20	131
8	20	198	10	20	169
9	20	102	10	20	25
10	20	102	10	20	67

Il suffit de comparer entre eux les résultats décrits dans le tableau précédent pour avoir la démonstration de cette proposition. Dans la première expérience, la boule a été laissée dans l'air pendant dix minutes, et dans la seconde, elle a été, pendant le même temps, au centre d'une sphère creuse de métal, qui était en communication avec le sol. Cette sphère avait 1 décimètre de diamètre, et la boule y était introduite par une ouverture de 3 centimètres. Dans la troisième expérience, la boule est restée pendant dix minutes en présence d'une boule de métal de 2 centimètres de diamètre et isolée. Les centres des deux boules étaient à la distance de 12 centimètres. Dans cette expérience, les deux boules avaient la même électricité, tandis que, dans la quatrième, la grande boule était chargée d'électricité contraire à celle de la boule de la balance. Dans la cinquième et dans la sixième expérience, on a opéré comme dans la troisième et la quatrième. Dans la septième expérience, la boule de la balance a été dans l'air, tandis que, dans la huitième, la boule était au centre de la sphère métallique. On a opéré de la même manière dans les neuvième et dixième expériences.

3° La perte de l'électricité dans les gaz purs, et autant que possible privés de vapeurs aqueuses, est indépendante de son intensité et par conséquent constante, du moins pour des quan-

tités d'électricité comprises entre certaines limites. Cette loi diffère de celle trouvée par Coulomb en opérant dans de l'air plus ou moins humide, et qui consistait en ce que la perte, dans un temps donné, était toujours en même proportion de la quantité totale de l'électricité. C'est en s'entourant de toutes les précautions possibles pour opérer dans de l'air et dans des gaz parfaitement desséchés au moyen de l'acide phosphorique, et en multipliant les expériences faites, soit d'après la méthode de Coulomb, soit suivant une méthode légèrement différente, que Matteucci a obtenu la perte de l'électricité dans une minute, c'est-à-dire dans l'unité de temps. Nous ne rapporterons pas ici les tableaux des résultats, qui montrent que, malgré les différences, d'ailleurs très-petites, qui existent tantôt dans un sens, tantôt dans le sens opposé, et qui sont inévitablement dues aux erreurs d'expériences, la perte de l'électricité est constante. Les expériences ont été faites au moyen de deux balles électrisées, dont on mesurait la force répulsive, soit en les ramenant à la même distance, suivant le procédé de Coulomb, soit en les tenant à une distance variable. Dans ce dernier cas, on trouve que la perte est plus grande quand la distance est moindre, ce qui est d'accord avec la seconde loi trouvée plus haut.

4° La perte de l'électricité est la même dans l'air, dans l'hydrogène et dans le gaz acide carbonique bien secs et pris à la même température et à la même pression. Les expériences qui ont conduit à ce résultat ont été faites à des températures qui ont varié de 8 à 11° : on choisissait des jours où l'atmosphère était très-sèche; on faisait le vide dans la cloche de la balance, en ayant soin d'y renouveler, chaque fois qu'on opérait avec un nouveau gaz, l'acide phosphorique qu'on y plaçait, puis on faisait entrer le gaz en l'introduisant très-lentement à travers un tube de Liebig rempli d'acide sulfurique concentré.

5° La perte de l'électricité, qui, dans les gaz secs et purs, est la même en général pour l'électricité positive et pour la négative, devient plus rapide pour l'électricité négative que pour la positive quand les charges électriques sont très-fortes. Cette proposition importante déjà signalée par Belli, et que confirment

d'autres faits relatifs aux décharges que nous étudierons dans l'instant, est établie par une série d'expériences faites en électrisant les deux boules de la balance, tantôt d'électricité positive, tantôt de la négative. On attend que l'aiguille mobile s'arrête à un certain nombre de degrés, à 15°, par exemple, puis on note l'instant au chronomètre; on détord très-lentement le fil, du nombre de degrés nécessaire pour que l'aiguille revienne à 15° au bout du même temps, 10 minutes, par exemple, qui est l'intervalle de temps entre les deux observations. Le tableau suivant montre combien la torsion a dû être plus diminuée dans les mêmes circonstances pour l'électricité négative que pour la positive, d'où il faut conclure que pour des charges électriques comparativement assez fortes, la perte dans l'air a été bien plus grande pour l'électricité négative que pour la positive.

TORSION et arc de repulsion.		TORSION et arc de repulsion.
ÉLECTRICITÉ POSITIVE.		ÉLECTRICITÉ POSITIVE.
140° + 15° 117 + 15 90 + 15 35 + 15		127° + 15° 107 + 15 75 + 15 27 + 15
ÉLECTRICITÉ NÉGATIVE.	APRÈS dix minutes.	ÉLECTRICITÉ NÉGATIVE.
140° + 15° 117 + 15 90 + 15 35 + 15		90° + 15° 66 + 15 60 + 15 12 + 15

6° La perte de l'électricité augmente dans l'air sec avec la température. Les expériences destinées à établir cette loi ne

peuvent être faites que dans des limites très-restreintes de température, entre 0° et 18°, car déjà au-dessus de 20° l'élévation de la température diminue la faculté isolante des tiges même de gomme-laque. Néanmoins, même entre ces limites, l'influence de la température sur le pouvoir isolant de l'air très-sec est très-sensible. Ainsi à 18° la perte de l'électricité de la boule isolée était de $\frac{1}{209}$, tandis qu'à 0° elle n'était que de $\frac{1}{419}$, c'est-à-dire seulement la moitié.

7° La perte de l'électricité dans l'air sec diminue avec la diminution de la densité de l'air. Ainsi la divergence d'un électroscope dans de l'air raréfié, à 3 millimètres de pression, était la même au bout de deux jours qu'au commencement de l'expérience, ce qu'il était impossible d'obtenir avec de l'air d'une densité plus grande. Cette expérience semble bien prouver que c'est par les particules mêmes de l'air que l'électricité s'écoule, puisque moins il y en a, moins l'écoulement est rapide. Il faut seulement remarquer que la quantité absolue d'électricité qui peut rester, sans s'échapper à l'état de tension, sur la surface d'un corps conducteur isolé, est beaucoup moindre quand l'air est raréfié que quand il est sous une pression plus forte. M. Matteucci en conclut que dans le vide parfait il n'y aurait point d'électricité retenue sur la surface du corps conducteur ; nous verrons plus loin jusqu'à quel point cette conclusion peut être admise.

8° La perte de l'électricité dans l'air pris à une température et à une pression constante augmente avec la quantité de vapeur d'eau contenue dans cet air, mais non suivant une loi simple, comme Coulomb l'avait cru. Ce n'est que dans l'air qui contient de très-grandes quantités de vapeur d'eau, que la perte se trouve approximativement proportionnelle à la tension ou à la quantité de vapeur d'eau, quelle que soit la température. Une chose assez remarquable, c'est que la présence, dans de l'air très-sec, d'autres vapeurs, telles que celles du camphre, de quelques huiles essentielles et même de l'éther sulfurique, n'exerce aucune influence sur la perte de l'électricité.

M. Matteucci, dans le travail important qui l'avait conduit aux résultats que nous venons de rappeler, avait cherché à

déterminer l'influence que peut avoir sur la perte de l'électricité la nature du corps électrisé. Comme Coulomb, il n'avait trouvé, à cet égard, aucune différence entre des boules ou disques métalliques, ou des boules ou disques de gomme laque; mais à une condition, c'est que la gomme laque soit électrisée par l'étincelle d'une machine, car si elle est électrisée par frottement, il y a une différence constante, ce qui tient très-probablement à ce que l'électricité, au lieu de n'être qu'à la surface, comme dans le premier cas, pénètre plus profondément et, par conséquent, ne peut pas s'échapper aussi facilement.

Après avoir étudié les lois de la propagation lente, soit déperdition de l'électricité dans les gaz, occupons-nous de celles auxquelles est soumise la propagation rapide qui peut s'opérer, soit par décharges, soit d'une manière continue, sous forme de courant.

On sait que lorsque le conducteur chargé de l'une ou l'autre des deux électricités est terminé en pointe, cette électricité s'écoule dans l'air avec facilité. Cette propriété des pointes, que nous avons déjà signalée, est fondée sur la grande densité que l'électricité y acquiert en vertu des lois de sa distribution. Elle peut être diminuée et même annulée si l'on place la pointe dans l'intérieur d'un conducteur creux; par exemple, si une pointe qui est fixée sur un disque métallique isolé et électrisé se trouve au milieu et dans l'axe d'un cylindre creux métallique plus élevé qu'elle, qui lui-même repose sur le disque. Une fois l'électricité accumulée à la pointe, elle sort et se propage en déterminant dans l'air un mouvement mécanique assez violent, qui tient probablement à la répulsion exercée par la pointe sur les particules d'air en contact avec elle, auxquelles elle a communiqué son électricité. Les corps en combustion, et les flammes en particulier, exercent le même effet que les pointes. Si l'on place, par exemple, deux disques métalliques l'un au-dessous de l'autre, l'inférieur communiquant avec le pôle d'une pile sèche qui l'électrise et le supérieur avec un électroscope, il suffit de placer dans le premier un fragment d'amadou incandescent pour que l'électroscope qui est lié au

second diverge fortement. L'amadou agit donc dans ce cas comme une pointe, car on peut annuler son effet comme celui de la pointe en l'entourant d'un cylindre creux, ce qui prouve que ce n'est point la fumée qui transporte l'électricité, car elle continue à monter comme auparavant en une épaisse colonne vers le disque supérieur. L'influence de l'amadou incandescent se fait sentir aussi bien en déchargeant le disque inférieur qu'en chargeant le supérieur. Elle agit également de haut en bas comme de bas en haut.

Riess a fait sur ce sujet un grand nombre d'expériences, en employant une mèche de coton et des bougies allumées; mais pour échapper à l'influence perturbatrice de la fumée, il a trouvé préférable de faire usage d'une préparation de salpêtre et de charbon unis ensemble avec de la gomme astringente, de façon à en faire des bougies de la longueur de 3 centimètres environ. Il a constaté ainsi l'influence des enveloppes conductrices qui empêchent le corps incandescent de décharger l'électricité du disque sur lequel il repose et de charger le disque qui est rapproché de lui, et il a établi d'une manière péremptoire l'analogie complète qui existe entre le mode d'action de ces corps et celui des pointes. Ce n'est donc pas au moyen des produits de leur combustion que les corps incandescents exercent leur propriété conductrice, mais en vertu d'un état particulier de leur surface, qui se conduit comme si elle était recouverte de pointes très-fines. Au reste, l'action des pointes très-courtes, mais très-parfaites, est constatée par une ancienne expérience dans laquelle on réussit à décharger un conducteur électrisé en lui présentant à distance un morceau d'amadou fait avec l'agaricus du chêne, sans avoir même besoin de l'allumer, ce qui tient aux pointes très-fines, à peine visibles, dont toute la surface de cette espèce d'amadou est recouverte. Il est facile de s'assurer de l'existence dans un corps en combustion de pointes semblables, qui se détruisent et se renouvellent constamment.

Dans les corps dont la combustion produit une flamme, ce sont les petits filets de vapeur et les pointes de charbon qui conduisent l'électricité, ainsi qu'on le prouve en remarquant

Digitized by Google

que la flamme ne perd point sa propriété conductrice en étant entourée d'un tube de métal, comme cela a lieu lorsque le corps incandescent perd son électricité par l'effet des pointes dont il est recouvert. On peut même voir, dans une expérience bien simple, l'action de ces deux portions conductrices de la flamme se succéder visiblement. Si on éteint subitement une bougie de cire qui brûlait avec vivacité, on voit la vapeur que renfermait sa flamme agir encore pendant quelques secondes comme conductrice; puis la mèche imprégnée de cire fondue cesse d'agir, de sorte que la fumée n'exerce plus aucune influence sur le corps électrisé qu'on en approche. Mais quand la cire cesse d'arriver à la mèche, celle-ci devient incandescente, et alors les petites pointes de charbon qui s'y forment conduisent l'électricité pendant un court instant.

La propriété des corps en combustion de conduire l'électricité peut servir à deux usages importants : le premier à enlever à un corps isolant son électricité en promenant autour de lui une petite flamme d'alcool ou la pointe d'une bougie allumée ; le second, à augmenter la sensibilité d'un électroscope destiné à percevoir une électricité éloignée, en plaçant sur lui un corps enflammé qui a le pouvoir de soutirer l'électricité à une plus grande distance encore qu'une pointe.

Dans tout ce que nous avons dit sur les corps en combustion, nous n'avons eu aucun égard à la nature de l'électricité employée; leur conductibilité est en effet la même pour l'une et pour l'autre électricité, pourvu que la combustion soit vive et parfaite, et que, lorsqu'on fait usage de l'amadou et du charbon, on ait soin de les dégager fréquemment de leurs cendres. Sans ces précautions, on aperçoit fréquemment que l'une des électricités est plus facilement conduite que l'autre, ce qui tient à ce qu'il a de l'électricité développée dans l'acte même de la combustion. Ce n'est donc que lorsque nous nous occuperons des sources mêmes de l'électricité, que nous pourrons apprécier la part d'influence que peut avoir dans le pouvoir conducteur des flammes le dégagement d'électricité qui accompagne leur production.

Lorsque l'électricité s'écoule par une pointe, nous avons

vu que cet écoulement est accompagné d'un mouvement de l'air qui est semblable à celui d'un souffle frais, et qui a été nommé vent électrique. Ce vent peut être rendu sensible en étant dirigé contre la flamme d'une bougie, contre les ailes d'un petit moulin de carton qu'il fait tourner, contre de la poudre de lycopode placée sur l'eau qu'il chasse devant lui. C'est à cette agitation de l'air ou plutôt à la répulsion que le courant électrique qui le traverse exerce sur celui de la pointe d'où il sort, qu'est due, comme nous l'avons vu, la rotation du moulinet électrique. En effet, dans l'air raréfié, ce mouvement n'a plus lieu, et il suffit aussi de placer le moulinet au milieu d'un vase dont les parois, très-rapprochées de lui, sont chargées de la même électricité que celle qu'on lui transmet, pour que la rotation cesse également. Le vent électrique favorise le refroidissement et la vaporisation des liquides. C'est ce qu'avaient déjà remarqué depuis longtemps plusieurs physiciens, mais ce que Peltier a constaté d'une manière positive. Dans ce but, il avait placé au-dessus d'un vase de platine rempli d'eau, à une distance de 15 à 18 centimètres, une boule métallique ou un faisceau de fils de métal terminés en pointe. L'eau ayant été chauffée à 80° ou 90° cent., il commença à s'élever de la surface des vapeurs visibles ; mais ce nuage de vapeur devint beaucoup plus considérable dès que l'on fit arriver aux pointes l'électricité d'une machine. Un thermomètre sensible, placé dans l'eau, indiquait aussi par son abaissement une augmentation dans la quantité de vapeur formée. Le phénomène n'était pas dû uniquement au renouvellement de l'air sur la surface du liquide chauffé; c'est ce dont M. Peltier s'assura en renouvelant artificiellement l'air au-dessus de cette surface, au moyen d'un ventilateur; l'effet était toujours moins considérable que celui que produisait le vent électrique.

Évidemment la transmission rapide de l'électricité à travers des conducteurs imparfaits, tels que l'air, tend à faire écarter les unes des autres les particules; c'est ce qu'on voit très-bien quand dans l'obscurité on étudie l'aigrette lumineuse qui est composée de filets divergents formés de petites particules rendues lumineuses par le passage de l'électricité. Cette même

tendance s'observe également dans les cas où les conducteurs imparfaits sont liquides. Ainsi Faraday a remarqué qu'en faisant passer l'électricité provenant du conducteur d'une machine électrique dans de la cire à cacheter rendue fluide par la chaleur, il s'en détache des fils très-fins, qui recouvrent comme d'une laine fine un papier placé au-dessous. Une goutte d'eau gommée, suspendue à l'extrémité d'une tige par laquelle lui arrive l'électricité, se résout en fils déliés quand on la plonge dans de l'essence de térébenthine mise elle-même dans un vase dont le fond métallique permet à l'électricité de s'échapper. Une goutte de mercure ou de chlorure de calcium s'allonge et devient pointue, et il s'en détache des petites gouttelettes qui sont entraînées par l'électricité dans l'air où se fait l'expérience. En se servant d'une goutte d'eau gommée, on observe, suivant la force de l'électricité qui lui arrive, des phénomènes assez divers. D'abord la goutte se transforme en cône; puis, à mesure que l'électricité augmente d'intensité, on voit une partie du liquide être entraînée, le reste devenir plus pointu et prendre une surface frisée, avec le bruit particulier aux aigrettes; enfin, avec une électrisation plus forte, une portion plus considérable du liquide est entraînée, la goutte restante s'allonge et se retire par accès en formant une forte aigrette lumineuse. Quand on fait arriver à la goutte d'eau gommée de l'électricité négative, le cône qui se forme est plus large qu'avec de la positive.

Une ancienne expérience du même genre que celles qui précèdent, due à Nollet, consiste à mettre de l'eau dans un entonnoir en métal muni de quelques ouvertures capillaires et communiquant avec le conducteur électrique. L'eau ne s'écoule que par gouttes isolées et de forme arrondie, tandis que, dès que l'entonnoir est électrisé, elle en sort en petits jets continus très-fins, divergents et lumineux dans l'obscurité.

Le plus souvent, au lieu de s'opérer d'une manière lente et continue, la propagation rapide de l'électricité à travers l'air et les gaz a lieu d'une manière instantanée et brusque par décharges. La distance à laquelle cette décharge peut avoir lieu, ou ce qu'on a nommé la *distance* ou *portée explosive*, dépend,

pour une même intensité de la charge électrique, de la densité et de la nature du milieu aériforme. Harris a trouvé, par diverses expériences, que les quantités d'électricité nécessaires pour traverser un intervalle donné varient dans un simple rapport avec la densité de l'air, et que, par conséquent, la portée explosive dans de l'air raréfié est inverse de la densité de l'air, ce qui fait que la même décharge peut traverser un intervalle d'air d'une longueur double lorsque la densité de cet air a été réduite de moitié. Si l'on réchauffe même jusqu'à 148° l'air renfermé dans un vase clos, on ne fait pas varier la portée explosive, tandis que si on laisse le vase ouvert, on l'augmente sensiblement, ce qui prouve que ce n'est pas la pression du fluide électrique, mais le nombre des particules qui détermine la difficulté plus ou moins grande que la décharge éprouve à le traverser. Knockenhauer, par une suite d'expériences dans lesquelles, laissant la distance explosive constante, il déterminait la densité de l'électricité nécessaire pour obtenir la décharge électrique à différents degrés de densité de l'air, avait trouvé que ces deux densités étaient à peu près proportionnelles l'une à l'autre, résultat également obtenu par Masson au moyen d'une méthode un peu différente.

Mais de tous les physiciens, celui qui a fait l'étude la plus consciencieuse de ce sujet est Riess. Nous renvoyons à une note finale l'exposition détaillée des méthodes et des calculs par lesquels Riess est arrivé à établir les lois qui régissent les décharges des batteries électriques [1]; nous nous bornons ici à donner la formule par laquelle il exprime la valeur de la portée explosive. Cette formule est $d = b\frac{q}{s}$, b étant la distance explosive pour la charge qu'on a prise pour unité, d la distance explosive pour la quantité q d'électricité, et s la grandeur de la surface de la batterie sur laquelle l'électricité est accumulée, soit le nombre des bouteilles dont se compose cette batterie. Afin de démontrer l'exactitude de la formule par l'expérience, Riess se sert d'un appareil qu'il nomme *micromètre à étincelles*,

[1] Voyez la note finale C.

et qui consiste (fig. 187) dans deux tiges métalliques verticales isolées, terminées chacune par une boule : l'une des tiges est fixe, l'autre est mue au moyen d'une vis micrométrique, ce qui permet de mesurer exactement la distance à laquelle il faut approcher les deux boules l'une de l'autre, pour que la décharge ait lieu entre elles. L'une des boules de l'instrument communique par un fil métallique avec l'armure intérieure, et l'autre avec l'armure extérieure, laquelle est également mise en communication avec un électromètre. Dans une première expérience, les boules du micromètre étaient à une distance $d = \frac{1}{2}1$; c'est la distance 1 dans le tableau qui suit; la batterie comparée de s bouteilles fut chargée jusqu'à ce que la décharge eût lieu, et l'électromètre indiqua la valeur de la quantité q d'électricité employée. On trouva ainsi la valeur de la constante b, qui donna $q = 0{,}833.\,sd$. Or, le tableau suivant donne pour différentes valeurs de d et de s les valeurs correspondantes de q observées directement et calculées d'après cette formule :

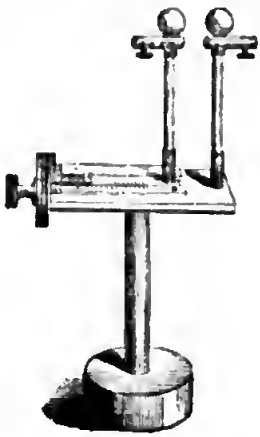


Fig. 187.

d.	2 s.		3 s.		4 s.		5 s.	
	q obs.	q calc.	q obs.	q calc.	q obs.	q calc.	q obs.	q calc.
1	»	»	3.0	2.25	3.5	3.3	4.3	4.2
2	3	3.3	5.5	5 0	7.0	6.7	8.5	8.3
3	4.6	5.0	7.0	7 5	10.1	10.0	12.5	12.5
4	6.4	6.7	10.3	10 0	13.5	13.3	16.0	16.7
5	7.5	8.3	»	»	16.0	16.7	»	»

L'accord du calcul avec l'observation montre bien l'exactitude de la formule. On voit même qu'on peut, sans le secours de l'électromètre, une fois la constante b donnée, déterminer

très-exactement, au moyen de cette formule, la quantité d'électricité dont la batterie est chargée, pourvu qu'on connaisse le nombre des bouteilles, soit la surface s de la batterie, et la distance explosive d fournie par le micromètre à étincelles.

Des essais faits avec divers gaz avaient montré à Doeberainer que la portée explosive est d'autant moindre que le gaz a lui-même plus de densité. Schaffautl avait trouvé, dans de l'hydrogène comprimé et chauffé jusqu'à 280° en vase clos, cette portée plus grande que dans de l'air ordinaire, dont la pression était cependant vingt-sept fois moindre.

Ces différences entre les divers gaz avaient déjà été signalées par Morgan, à la fin du dernier siècle. Il avait remarqué le rapport qui existe entre la distance explosive et la charge de la batterie, et que, pour une même charge, l'hydrogène fournit la plus grande distance explosive, et le gaz acide muriatique la moindre. Faraday a repris, il n'y a pas longtemps, l'étude ébauchée par Morgan : sa méthode, sans être rigoureuse, conduit à des résultats approximatifs qui, s'ils n'offrent pas une précision mathématique, permettent tout au moins de classer les différents gaz dans l'ordre de leur perméabilité par la décharge électrique. Il fait communiquer le conducteur d'une machine électrique à la fois avec un appareil composé de deux boules métalliques entre lesquelles l'étincelle doit passer en traversant l'air ordinaire, et à la fois avec un appareil semblable placé dans l'intérieur d'un récipient où l'on peut faire le vide et introduire différents gaz (fig. 188). Les deux boules de l'appareil placé dans le récipient sont à une distance constante de 16 millimètres l'une de l'autre, tandis qu'on peut diminuer ou augmenter la distance mutuelle des deux boules placées dans l'air, de façon que l'étincelle électrique passe par l'une ou l'autre des deux voies qui lui sont offertes, ou se partage également entre elles. Faraday a déterminé pour chacun des gaz, en les introduisant successivement dans le récipient, quelle était la plus petite distance à laquelle les deux boules situées dans l'air pouvaient être placées l'une par rapport à l'autre, pour que l'étincelle préférât traverser encore le gaz, et non plus l'air, et la distance la plus grande qu'on pouvait leur donner sans que

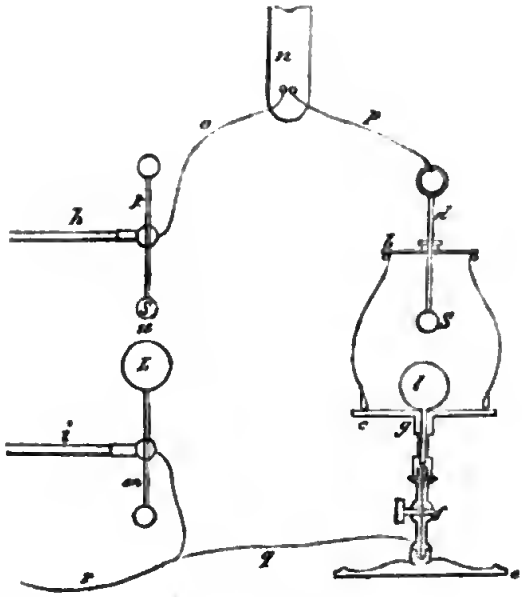


Fig. 188.

l'étincelle cessât de passer à travers l'air de préférence au gaz. Entre ces deux distances, l'étincelle doit se partager entre l'air et le gaz : en en prenant la moyenne, on obtient pour chaque gaz la valeur de la distance explosive dans l'air équivalente à celle du gaz, qui est toujours de 16 millimètres. Comme, d'un autre côté, les quantités d'électricité qui passent dans l'air entre les boules sont proportionnelles aux éloignements de ces boules, on peut connaître au moyen de ces éloignements la quantité d'électricité qui est nécessaire pour franchir la même distance explosive dans chaque gaz. C'est ainsi qu'on trouve que sous la même pression et à la même température, cette quantité est la plus grande pour le gaz acide hydrochlorique, et la plus petite pour l'hydrogène, de sorte qu'avec la même quantité d'électricité, l'étincelle serait la plus longue dans l'hydrogène et la plus courte dans le gaz acide hydrochlorique, résultat conforme à celui qu'avait trouvé Morgan.

Les gaz soumis à l'expérience avaient tous été desséchés avec soin, étaient à la même température et sous la pression atmosphérique. Voici, du reste, un tableau dans lequel, à côté de chaque gaz, est indiquée la distance moyenne explosive des

deux boules dans l'air, équivalente à la distance explosive constante des gaz[1] :

Acide hydrochlorique.	1.105
Gaz oléfiant	0.750
Air ordinaire.	0.695[2]
Gaz acide carbonique.	0.640
Azote	0.615
Oxygène	0.505
Gaz de la houille	0.490
Hydrogène	0.370

Dans les expériences de Faraday, les deux boules mises en communication avec le conducteur de la machine électrique, et placées l'une dans le gaz, l'autre dans l'air, étaient de même grandeur, mais avaient un diamètre d'environ moitié moindre de celui de leurs deux boules correspondantes qui communiquaient avec le sol. Il résultait de là que, si le conducteur de la machine était chargé d'électricité négative au lieu de l'être de positive comme dans les expériences ci-dessus, les distances explosibles dans l'air équivalentes à celles de chacun des gaz étaient toutes un peu moindres, mais l'ordre des gaz n'en était pas altéré, sauf que la différence entre le gaz acide hydrochlorique et le gaz oléfiant devenait à peu près nulle.

Les expériences que nous venons de rapporter sont loin, comme Faraday le remarque lui-même, d'avoir la précision qui serait nécessaire pour qu'on pût attacher aux nombres du tableau ci-dessus une importance très-grande, car bien souvent des circonstances imprévues les ont fait varier entre des limites assez considérables. Ainsi, un peu de poussière, un peu plus ou un peu moins d'humidité dans l'air, modifiaient la direction et la longueur de l'étincelle dans des conditions en apparence

[1] Les distances sont exprimées en pouces et fractions de pouce, et la distance constante des deux boules dans le récipient, où l'on introduisait successivement les divers gaz, était de 0p, 62.

[2] Ce résultat ne me paraît pas pouvoir être admis, car la distance explosive pour l'air dans le récipient doit être égale à celle pour l'air hors du récipient, c'est-à-dire de 0p, 62, puisque c'est le même air sous la même pression et sous la même température.

les mêmes. Néanmoins il résulte de l'inspection du tableau ces deux faits importants : le premier, c'est que sous la même pression et à la même température les divers gaz exigent des charges différentes d'électricité pour être traversés par l'étincelle dans un trajet de même longueur; le second, que ces différences ne tiennent pas uniquement à la densité du gaz, mais aussi à sa nature, puisque le gaz oléfiant, moins dense que l'oxygène et surtout que l'acide carbonique, exige une charge plus forte. Il est seulement à regretter que la différence de diamètre des boules ait introduit un élément étranger dans l'étude même du phénomène, qui se trouve ainsi un peu complexe.

Nous voyons, d'après ce qui précède, qu'il faut distinguer, en ce qui concerne la propagation de l'électricité dans les gaz, le cas de la propagation lente, soit déperdition, de celui de la propagation rapide, soit décharge. Dans le premier cas, en effet, la densité du gaz, soit le nombre de ses particules, est une circonstance favorable à la propagation, et la nature du gaz n'a que peu ou point d'influence. Dans le second, la densité du gaz est au contraire une circonstance défavorable, et la nature du gaz a une influence très-prononcée. Il y a de plus dans ce dernier cas un mouvement, une agitation de l'air, qui indique que son déplacement est nécessaire à la propagation, et que, par conséquent, loin de la faciliter, sa présence la contrarie. Les choses se passent de même quand la propagation rapide se fait sous forme de courant continu au lieu de s'opérer par décharges. C'est ce dont nous nous sommes assurés, M. Colladon et moi, en faisant passer sous forme de courant, suivant le mode imaginé par M. Colladon lui-même[1], de l'électricité statique accumulée et renouvelée constamment sur un conducteur isolé, à travers de l'air ordinaire pris à différents états de densité, de température et d'humidité. Nous faisions usage d'un globe de verre de 20 à 25 centimètres de diamètre, muni de deux tubulures sur le même diamètre. Nous faisions passer à travers l'une des tubulures une tige métallique isolée terminée dans l'intérieur du globe par une boule en platine et

[1] Tome I, page 327.

communiquant extérieurement avec le conducteur électrisé; l'autre tubulure était traversée par une tige semblable, mais terminée intérieurement par une pointe en platine maintenue à 1 ou 2 centimètres de distance de la boule, et aboutissant extérieurement à l'un des bouts du fil bien isolé d'un galvanomètre, dont l'autre bout communiquait avec le sol. En opérant avec soin, nous nous étions assurés que dans de l'air raréfié jusqu'à 1 ou 2 millimètres, l'aiguille du galvanomètre éprouvait une déviation aussi forte quand la pointe et la boule de platine étaient à 5 centimètres de distance que lorsqu'elles étaient en contact l'une avec l'autre; la déviation était de 55° dans les deux cas, tandis qu'elle n'était que de 35° dans de l'air sous la pression de 72 centimètres. Dans une autre expérience, l'air ayant été raréfié et chauffé jusqu'à 50°, la déviation était de 57°, tandis qu'elle n'était que de 24° avec de l'air sous la pression de 73 centimètres à la même température. La distance de la boule et de la pointe étaient dans ce cas de 13 centimètres. Si l'intérieur du globe était saturé de vapeur aqueuse, l'air y étant très-raréfié, la transmission de l'électricité s'y faisait moins facilement que dans de l'air très-raréfié, mais sec. En effet, le ballon étant chauffé comme précédemment à 30°, on avait 55° de déviation, la pointe et la boule étant à 5 centimètres de distance, et 60° quand elles étaient en contact; tandis que dans l'air très-raréfié, chauffé, mais sec, la déviation était exactement la même, que la boule et la pointe fussent en contact ou qu'elles ne le fussent pas.

M. E. Becquerel a obtenu des résultats bien plus complets et remarquables en transmettant le courant d'un ou plusieurs couples à travers différents gaz. Son appareil consistait dans un tube de platine tiré à la filière et sans soudure, de 65 centimètres de longueur et de 1 de diamètre intérieur, assez épais pour qu'on pût faire le vide dans l'intérieur sans le déformer, même quand une partie de sa longueur était portée à la température rouge blanc. Le tube traversait un fourneau et était disposé de façon à pouvoir être porté au rouge sur une longueur de 19 centimètres. Il était terminé, à ses deux extrémités, par des bouchons portant des tubes de verre, qui permet-

taient d'introduire dans le tube de platine divers gaz et de les raréfier au moyen de la pompe pneumatique. Un fil de platine qui traversait l'un des tubes servait d'électrode, le tube lui-même faisant l'office de l'autre électrode. Dans quelques cas M. E. Becquerel employait comme électrodes des fils de platine isolés et passant, sans le toucher, au milieu d'un tube de porcelaine chauffé au rouge. Toutes les précautions étaient prises pour que les supports et les différents ajustages ne fussent pas exposés à des variations de température qui auraient pu modifier leur pouvoir isolant, en sorte que le gaz seul et les électrodes fussent soumis à ces variations dans ces différentes expériences. Celles-ci étaient conduites en faisant passer le courant produit par un ou plusieurs couples de Grove par le fil d'un galvanomètre sensible et à travers le gaz placé dans le tube. Le circuit renfermait aussi un rhéostat, formé d'une colonne liquide d'un très-petit diamètre, qu'on pouvait allonger ou raccourcir en enfonçant plus ou moins un fil de platine servant d'électrode dans un tube divisé qui renfermait la colonne; ce liquide était de l'eau distillée tenant en dissolution des proportions variables de sulfate de cuivre suivant les expériences, et l'autre électrode était une lame métallique placée au bas de la colonne et en communication avec elle. Quand on voulait opérer, on commençait par ôter du circuit le gaz soumis à l'expérience, et on donnait à la colonne liquide du rhéostat une longueur telle que l'aiguille du galvanomètre fût déviée, par exemple, de 20°, puis, sans rien changer, on remettait le gaz dans le circuit, et on abaissait l'extrémité du fil de platine du rhéostat jusqu'à ce qu'en diminuant la résistance de la colonne liquide d'autant qu'on avait augmenté celle du circuit en y introduisant le gaz, on eût ramené la déviation de l'aiguille à ce qu'elle était, c'est-à-dire à 20°. Évidemment l'intensité du courant demeurant constante, la longueur de la colonne liquide comprise entre les deux portions de l'extrémité du fil de platine était équivalente à la résistance du gaz contenu dans le tube, augmentée de la résistance au passage des deux électrodes qui transmettaient le courant dans le gaz.

Au moyen de cet appareil, M. E. Becquerel a constaté plu-

sieurs faits importants. Il s'est d'abord assuré que la propagation du courant à travers le gaz ne pouvait avoir lieu avant que celui-ci eût atteint la température rouge, mais qu'à partir de ce point, la résistance du gaz diminuait progressivement à mesure que la température s'élevait, et que cette diminution était très-rapide quand le tube était chauffé fortement au rouge blanc. Tous les gaz présentent la même propriété, mais toutefois à des degrés différents. Quand on se sert, pour transmettre le courant dans le gaz, du tube et du fil, on trouve que la transmission est plus facile quand c'est le tube, c'est-à-dire l'électrode le plus étendu, qui est négatif et le fil qui est positif, que dans le cas inverse[1]. Avec deux fils de platine parallèles et isolés pour électrodes, il n'y a pas de différence, et la transmission a lieu avec une égale facilité, que le courant marche dans un sens ou dans l'autre. On trouve, en employant ces deux fils placés à 3 millimètres de distance l'un de l'autre, que la *résistance de l'air chauffé au rouge dépasse* 30 *mille fois celle de l'eau contenant* $\frac{1}{2}$ *dix-millième de sulfate de cuivre en dissolution*. Cette résistance comprend celle qui est due au passage de l'électricité des électrodes dans le gaz, indépendamment de celle qui est due au passage à travers le gaz lui-même.

Pour constater l'influence de la force élastique des gaz sur leur résistance au passage de l'électricité, on n'a qu'à raréfier l'air ou le gaz contenu dans le tube de platine, en ayant soin de maintenir le tube à la température rouge. Voici le résultat d'une expérience faite avec le courant d'un seul couple transmis à travers de l'air maintenu à la température rouge, mais raréfié graduellement jusqu'à la pression de 2 millimètres de mercure : l'aiguille du galvanomètre était ramenée à la déviation constante de 25° au moyen du rhéostat.

Force élastique.	Résistance.
Pression ordinaire.	20.9
137, mill. 0	7.1
40, mill. 5	4.8
2, mill. 0	3.8

[1] M. Andrews, en étudiant le pouvoir conducteur pour l'électricité des flammes

Même dans le cas de la raréfaction la plus grande, il existe encore une résistance bien appréciable entre les deux électrodes de platine, qui est supérieure à $\frac{1}{10}$ de la résistance que présente l'air chauffé à la même température, à la pression ordinaire.

Un fait assez important à noter, c'est que la température à laquelle un gaz commence à transmettre le courant voltaïque est la même, que ce gaz soit raréfié ou maintenu à la pression ordinaire; il faut une température aussi élevée dans le premier cas que dans le second; mais une fois qu'on a atteint cette température, qui est celle du rouge naissant, les différences deviennent sensibles avec les variations de pression.

On peut classer comme suit les gaz dans l'ordre de la résistance qu'ils présentent au courant à la température rouge blanc, sous la pression de l'atmosphère, les électrodes étant en platine et la résistance de l'air étant prise pour unité :

Hydrogène [résistance comprise entre 0.3 et 0.4].
Hydrogène protocarboné.
Oxygène [résistance comprise entre 0.4 et 0.7].
Chlore [résistance ne dépassant pas 0.9].
Protoxyde d'azote et azote [résistance peu différente de celle de l'air].
Acide carbonique [résistance comprise entre 1.2 et 2].
Vapeur d'eau [résistance plus forte que l'air].

La chaleur comme la raréfaction agit sur tous les gaz pour diminuer leur résistance à la transmission de l'électricité, mais cette diminution n'est pas égale pour tous; à mesure qu'on les chauffe et qu'on les raréfie, les rapports qui expriment leur résistance au passage du courant tendent sans cesse à se rapprocher de l'unité. Quand on arrive à la pression de 3 ou 4 millimètres de mercure, toutes les substances gazeuses transmettent également bien le courant, pourvu que leur température soit la

et de l'air chauffé, avait déjà trouvé que l'air chauffé jusqu'au rouge par une lampe d'Argant, ne conduisait le courant d'une pile de 20 couples qu'autant que le pôle positif communiquait avec le fil de platine placé dans l'air chaud, et le négatif avec le tube de laiton de la lampe près de l'orifice d'où sortait la flamme; dans le cas inverse, le courant ne passait pas; c'était au moyen de la décomposition du iodure de potassium que la transmission du courant était accusée.

même. La chaleur agit dans le même sens que la diminution de pression; mais elle a une action propre bien évidente, puisqu'à la température ordinaire, dans le vide le plus parfait qu'on puisse produire, il n'y a pas de transmission électrique appréciable, tandis qu'à la température rouge, l'électricité peut traverser un gaz, même quand il n'est pas raréfié.

La résistance que les gaz offrent, dans leurs diverses conditions de température et de raréfaction, à la transmission de l'électricité, varie avec le nombre des couples et avec l'intensité du courant produit par le même nombre de couples. L'étude que M. E. Becquerel a faite de ces anomalies semblerait démontrer qu'elles tiennent aux résistances variables suivant son intensité que le courant éprouve à passer des électrodes dans le gaz.

Les expériences de M. E. Becquerel sont de nature à confirmer la remarque que nous faisions plus haut sur la différence qui existe dans l'action des substances gazeuses, entre le cas de la déperdition lente et celui de la propagation rapide de l'électricité. Nous voyons même que l'influence de la densité et de la nature du gaz est presque la même, que la propagation rapide ait lieu par décharge ou par courant : quant à celle de la température, elle n'a pas été étudiée dans le cas des décharges; il est bien probable qu'elle conduirait à des résultats analogues à ceux qui ont été obtenus pour le cas des courants.

Il nous paraît donc résulter de tout cet ensemble de recherches que le rôle de l'air et des gaz est exclusivement négatif quand il s'agit de la propagation rapide de l'électricité, tandis qu'il est positif quand il est question de la propagation lente ou déperdition. Dans ce dernier cas, les particules du gaz sont polarisées par l'électricité du corps qui est placé au milieu d'elles, et elles déchargent le corps et se déchargent successivement les unes les autres plus ou moins lentement suivant certaines circonstances, de la même manière que cela a lieu pour les particules des conducteurs imparfaits solides et liquides. Aussi les conditions du phénomène sont-elles les mêmes, que les corps au moyen desquels s'opère la déperdition lente soient gazeux, liquides ou solides. Il est possible cependant que dans les corps gazeux la propagation de l'électricité s'opère par un petit mou-

vement, soit déplacement des particules, comme cela a lieu pour la propagation de la chaleur.

Si la propagation est rapide, la tendance des deux électricités à se réunir est contrariée par la présence des particules isolantes, que le milieu soit gazeux, solide ou liquide. Cette réunion, c'est-à-dire la décharge ou le courant ne peuvent donc avoir lieu qu'autant que les particules seront écartées; de là la rupture des corps solides, le mouvement et l'agitation des particules dans les liquides et les gaz; de là aussi les différences entre les diverses substances quant à leur facilité à laisser passer la décharge; les gaz dont les particules sont plus mobiles la laisseront mieux passer, et parmi eux il y aura encore des différences tenant à leur différence de mobilité, laquelle n'est point en rapport avec leur pesanteur spécifique. L'influence de la raréfaction ne devient pas moins facile à comprendre une fois que la particule du gaz n'est plus un conducteur plus ou moins imparfait, mais un obstacle à la transmission de l'électricité. Enfin, l'effet de la température s'explique également si on se borne à le considérer dans les électrodes solides chargés des électricités contraires, et non dans les gaz où il peut être considéré comme nul, puisqu'il est le même, que le gaz soit à sa densité ordinaire, ou qu'il soit raréfié au point de ne plus contenir que 2 mill. de mercure.

Un fait important à signaler encore avant de quitter le sujet de la propagation de l'électricité dans les gaz, c'est la différence qui existe entre l'électricité positive et la négative quant à leur facilité respective à déterminer la décharge dans les mêmes circonstances. Nous avons fait remarquer cette différence en ce qui concerne la propagation lente, en rapportant les expériences de Matteucci; Belli avait déjà, avant Matteucci, observé que l'électricité négative à tension égale se dissipe plus promptement que la positive, l'état de l'atmosphère et la disposition de l'appareil étant exactement les mêmes; il opérait au moyen d'un électromètre à cadran, dont les boules mettaient 10′ 2″ à descendre de 200 à 10° quand elles étaient chargées d'électricité positive, et seulement 4′ 30″ quand elles étaient chargées d'électricité négative. Quant à la transmission

rapide ou décharge, on sait depuis longtemps la différence frappante que présente la lumière qui l'accompagne sous forme d'aigrette, suivant que la surface électrisée d'où elle part est positive ou négative. Mais, indépendamment de cette apparence, que nous étudierons en nous occupant de la lumière électrique, il y a un fait plus général établi par Faraday en ce qui concerne la décharge elle-même.

Remarquons d'abord que lorsque la décharge a lieu à travers l'air entre deux boules de grandeur inégale, l'étincelle est beaucoup plus longue quand c'est la boule la plus petite qui est positive et la plus grande négative, que dans le cas inverse; ainsi, dans le premier cas, elle peut avoir de 20 à 30 centimètres de longueur, et dans le second, 2 ou 3. Il y a aussi une différence importante dans la longueur de l'étincelle, suivant que les boules reçoivent directement l'électricité de la source, c'est-à-dire sont *inductrices*, ou qu'elles la reçoivent par induction, c'est-à-dire qu'elles sont *induites*. Ainsi l'étincelle est deux fois plus longue quand la petite boule est rendue positive directement, que lorsqu'elle l'est par induction; une différence analogue, mais moins considérable cependant, peut être observée quand la boule est négative au lieu d'être positive.

Pour bien déterminer les degrés différents de tension ou de charge électrique qu'acquièrent les petites boules avant que la décharge ait lieu, suivant qu'elles sont positives ou négatives, on peut faire usage de l'appareil suivant (fig. 189), composé de

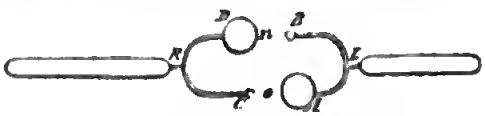


Fig. 189.

deux fourches métalliques L et R terminées chacune par des boules de diamètres différents; les boules A et D ont 5 centimètres de diamètre et les boules B et C 5 millimètres; la distance entre chacune des grandes boules et la petite, dans la même fourche, est de 12 centimètres environ; les deux fourches étant mobiles, on peut faire varier les intervalles *n* et *o*; on met l'une d'elles en communication avec la source d'électricité, et

l'autre avec le sol. Les intervalles *n* et *o* étant de 24 millimètres chacun et les boules *A* et *B* étant positives et inductrices, la décharge a lieu en *n*, le plus souvent avec une aigrette; les mêmes boules étant toujours inductrices, mais négatives, la décharge a encore lieu en *n*, mais toujours avec aigrette. Ici, l'avantage est en faveur de la petite boule inductrice, qu'elle soit positive ou négative; mais si l'on fait l'intervalle *n* de 22 millimètres et l'intervalle *o* de 16, la décharge a lieu également entre les deux intervalles, quand A et B sont inductrices et positives; quand elles sont négatives, la décharge a lieu en plus forte proportion en *n*, ce qui semble prouver que la petite boule se décharge plus facilement quand elle est négative que lorsqu'elle est positive. Cette expérience et d'autres du même genre conduisirent Faraday à admettre que de deux surfaces également conductrices, placées dans l'air et électrisées au même degré, celle qui est négative se décharge à une tension un peu plus basse que celle qui est positive; et que, lorsque la décharge a lieu, elle passe dans une plus forte proportion de la surface positive à la négative, que de la négative à la positive.

Ces différents effets tiennent très-probablement à la nature du corps diélectrique interposé, qui est ici l'air ordinaire, et à la manière dont ses particules se polarisent; ce qui le prouve, c'est qu'ils varient avec les gaz placés sur la route de la décharge. Faraday, pour étudier l'influence des divers gaz, avait disposé l'appareil de la figure 189 de manière que les deux fourchettes fussent dans un récipient où l'on introduisait le gaz, et que chaque paire de boules pût communiquer extérieurement au récipient, comme dans la figure 188, soit avec une source d'électricité, soit avec le sol. En opérant comme avec l'air, c'est-à-dire en rendant A et B tantôt inducteurs positifs, tantôt inducteurs négatifs, on trouve que la petite boule *négative* a une supériorité décidée sur la boule *positive* pour déterminer la décharge dans les gaz oléfiant et acide carbonique, tandis que dans l'azote et l'hydrogène, c'est l'inverse.

Les phénomènes qui viennent de nous occuper sont donc intimement liés avec la manière dont a lieu la propagation

de l'électricité dans les fluides élastiques, et par conséquent avec les effets qui accompagnent cette propagation ; aussi aurons-nous l'occasion d'y revenir dans les chapitres suivants, consacrés à l'étude de ces effets. Ils se rattachent à la même cause à laquelle sont dues les différences observées par M. E. Becquerel dans la facilité de la transmission du courant électrique à travers les gaz, suivant que c'est par le tube ou le fil de platine qu'arrive l'électricité positive. Enfin, quand nous étudierons les phénomènes de décomposition qui accompagnent le passage de l'électricité dynamique à travers les liquides, nous verrons des effets de mouvement et de transport des liquides eux-mêmes du pôle positif au négatif, qui indiquent encore une disparité dans le mode d'action des deux électricités.

§ 6. Considérations générales sur le mode de transmission de l'électricité dans les corps et dans le vide, et sur quelques phénomènes moléculaires qui en sont la conséquence.

L'étude que nous venons de faire de la propagation de l'électricité à travers les corps solides, liquides et gazeux, et à travers les bons conducteurs et les conducteurs imparfaits, nous amène naturellement à distinguer deux modes de transmission. Le premier se fait par l'intermédiaire des corps, de molécules à molécules, et plus ou moins rapidement suivant le degré de conductibilité de ces corps et de ces molécules; c'est celui que nous appellerons avec Faraday *conduction*, et qui est toujours accompagné de l'induction moléculaire. Tous les corps peuvent donc être considérés comme conducteurs, ceux que nous appelons isolants étant seulement conducteurs à un degré si faible, qu'ils ne permettent pas une propagation assez rapide de l'électricité pour qu'il y ait courant : il y a seulement déperdition lente. Le mode de transmission par conduction peut être accompagné d'effets calorifiques et d'effets chimiques; dans ce dernier cas, il constitue le mode par *électrolyse*, qui n'en est qu'un cas particulier, que Faraday regarde cependant comme un mode

distinct. Le second mode a lieu à distance; il est le résultat de la tendance que les deux électricités ont à s'unir en vertu de leur attraction mutuelle, et il s'opère d'autant plus facilement que le milieu, nécessairement isolant, interposé entre les deux conducteurs solides, positif et négatif, renferme un moindre nombre de particules matérielles. Le milieu le plus favorable à ce mode serait donc le vide parfait; c'est ce que toutes les expériences semblent démontrer. Mais il ne suit nullement de là que le vide soit conducteur, car la conductibilité suppose une succession de particules matérielles qui propagent l'électricité; or il s'agit ici de la transmission à distance sans l'intermédiaire de particules contiguës. Le vide joue donc simplement ici un rôle négatif, c'est-à-dire qu'il est l'état de l'espace le plus favorable à la réunion des deux électricités à distance, parce qu'il ne renferme pas de matière qui s'y oppose; mais lui-même ne conduit pas, comme nous allons le prouver.

Comment s'opère cette réunion à distance des deux électricités? Est-ce simplement à travers l'éther et par son intermédiaire? ou a-t-elle toujours lieu par l'intermédiaire de particules très-fines, détachées des électrodes chargés d'électricités contraires et transportées de l'un à l'autre? Faraday admet les deux modes également : il nomme le premier décharge *disruptive*, parce qu'il s'opère par le déplacement violent des particules du milieu ambiant, en produisant de la lumière sous différentes formes, et le second décharge par *convection* ou transportante, parce que la décharge a lieu au moyen de particules transportées, différant de la conduction, dans laquelle les particules matérielles n'ont pas de mouvement sensible. Je serais disposé à croire que ces deux modes n'en font qu'un, et que dans les cas même où la décharge est la moins forte, il se passe en petit ce qui a lieu en grand dans le phénomène de l'arc voltaïque, c'est-à-dire un véritable transport de molécules très-divisées. Toutes les conditions, telles que le réchauffement des électrodes, la raréfaction du milieu gazeux, qui favorisent la transmission, sont de nature à faciliter l'arrachement par l'électricité et le transport de petites particules appartenant aux électrodes. Il est vrai qu'il semble difficile de concevoir que l'électricité d'un seul couple

puisse, comme M. Becquerel l'a remarqué, avoir assez d'intensité pour être transmise de cette manière; mais cette objection n'est point péremptoire, car nous verrons bien d'autres exemples où l'électricité d'un couple unique peut, lorsque les circonstances sont favorables, produire des effets qui exigent ordinairement une pile de plusieurs couples. Or, dans les expériences de M. Becquerel, la haute température à laquelle les électrodes sont portés et leur grand rapprochement doivent faciliter singulièrement la production de l'effet que nous venons d'indiquer. Au reste, nous ne pourrons traiter convenablement la question importante que nous venons de soulever que dans le chapitre où nous nous occuperons des effets calorifiques et lumineux de l'électricité; c'est là que nous pourrons examiner si l'on doit admettre que les deux électricités puissent se réunir à distance sans l'intermédiaire de particules matérielles, ou si cette réunion exige toujours nécessairement la présence, soit de la matière continue, ce qui constitue la conduction, soit des particules transportées entre les deux corps chargés d'électricités contraires, ce qui réduirait à deux seulement les différents modes de décharge. Et même il ne serait pas impossible que ces deux modes ne différassent pas essentiellement l'un de l'autre. En effet, qu'est-ce que la conduction, sinon une suite de décharges qui se passent de molécules à molécules, à des distances infiniment petites, au lieu de s'effectuer entre des corps de certaine dimension, à des distances de grandeur finie? De plus, dans la conduction, les décharges ont lieu à travers le vide moléculaire, et par conséquent, soit à cause de cette circonstance, soit à cause des petites distances qui séparent les molécules, il n'est pas nécessaire que l'électricité possède une grande intensité pour être transmise. On peut se demander seulement aussi si les décharges moléculaires ont lieu uniquement par l'intermédiaire de l'éther interposé, ou s'il y a un transport très-minime de matière d'une particule à une autre. Cette question, qui est exactement la même que celle que nous avons soulevée pour les décharges qui s'opèrent à des distances finies, ne peut être convenablement traitée qu'en étudiant les effets que produit chez les corps le passage de l'électricité. Toutefois nous pouvons déjà remarquer

que l'altération moléculaire qu'éprouvent les conducteurs solides qui ont longtemps servi à la transmission du courant, et qu'a signalée M. Peltier, et les décompositions chimiques qui accompagnent cette transmission dans les liquides, sembleraient plutôt favorables à l'idée d'un mouvement atomique et moléculaire.

Ainsi donc, en résumé, il n'y aurait qu'un mode de propagation de l'électricité dynamique, celui par décharges, s'opérant ou de molécules à molécules et à des distances infiniment petites, ou de corps à corps à des distances finies, se succédant, tantôt d'une manière assez rapide pour constituer le courant, tantôt trop lentement pour affecter cette forme. La seule question qui resterait à résoudre serait de savoir si ces décharges ont lieu toujours par l'intermédiaire de parties matérielles, ou si elles peuvent avoir lieu également par l'intermédiaire de l'éther et sans la présence de substances pondérables. C'est cette question que nous serons appelés à examiner dans les chapitres suivants de cette quatrième partie, où nous nous occuperons des effets de la propagation de l'électricité, après nous être bornés dans celui-ci à faire une étude générale et aussi complète que possible de cette propagation elle-même.

Nous avons maintenant à donner des preuves directes de la non-conductibilité du vide, que nous avons admise plus haut. Ces preuves sont très-difficiles à obtenir, parce qu'il est impossible de priver complétement un espace de toute matière pondérable; il reste toujours dans le vide de la pompe pneumatique, et même dans le vide barométrique, une certaine quantité de vapeurs. Cependant en remplissant de mercure, qu'on a bien fait bouillir, un tube fermé à un bout et qui plonge par sa partie ouverte dans une cuvette pleine aussi de mercure, on peut obtenir au haut du tube un espace bien vide en raréfiant l'air au-dessus du mercure de la cuvette, ce qui fait baisser la colonne renfermée dans le tube. En entourant la partie vide du tube d'une armure métallique et en l'électrisant comme une bouteille de Leyde, Morgan avait d'abord vu de la lumière électrique dans l'intérieur, ce qui semblait prouver que le vide était conducteur et se conduisait comme une armure intérieure. Mais en prenant

la précaution de bien dessécher le mercure et le tube, il n'obtint plus aucun effet, et il put s'assurer en électrisant l'enveloppe extérieure qu'aucune trace d'électricité n'était développée dans l'intérieur. Erman, après avoir inséré un fil de platine dans le haut d'un tube barométrique et y avoir fait un vide aussi parfait que possible en faisant bien bouillir le mercure, s'assura, au moyen d'un électroscope mis en communication avec le mercure isolé de la cuvette barométrique, que de l'électricité qu'il faisait parvenir au fil de platine n'arrivait point à l'électroscope, et ne traversait par conséquent pas l'espace vide long de 16 centimètres, compris entre ce fil et le haut de la colonne de mercure. Davy avait constaté, de son côté, au moyen d'un petit électroscope attaché à un fil de platine qui lui-même était fixé, comme dans l'expérience précédente, au haut d'un tube vide d'air reposant par sa base sur du mercure, que les balles de cet électroscope divergeaient quand on électrisait extérieurement le bout du fil de platine auquel elles communiquaient. Cependant cette divergence n'aurait pas eu lieu si l'électricité avait pu se propager à travers l'espace vide. Nous avons déjà vu[1] qu'Harris et Becquerel ont également maintenu pendant plusieurs jours la divergence des feuilles d'or d'un électroscope, en le plaçant sous un récipient où l'air avait été raréfié, autant que cela était possible, au moyen de la pompe pneumatique. Riess a fait la même observation; il a même remarqué que la divergence d'un électroscope, qui était descendue de 13 millimètres à 9 au bout de 55 minutes dans l'air d'un récipient, demeura la même, c'est-à-dire de 13 millimètres, pendant 68 minutes, quand l'air eut été raréfié jusqu'à ne plus soutenir que 10 millimètres de mercure. Seulement il faut, pour que cette divergence se maintienne, que le corps électrisé placé dans le vide soit à une distance suffisamment grande de tout corps conducteur communiquant avec le sol; autrement l'électricité se dissipe et on aperçoit une lueur bleuâtre entre le corps électrisé et le conducteur voisin.

Nous pouvons donc admettre qu'un corps électrisé entouré

[1] Tome I, page 127.

de tout côté d'un vide parfait, conserverait toujours son électricité, pourvu qu'il fût à une distance de tout autre corps suffisante pour qu'il ne pût se décharger sur lui, distance nécessairement dépendante de l'intensité de son électricité. Il résulte de là que l'électricité reste à la surface des corps conducteurs, tant qu'elle n'est pas enlevée par le contact de particules plus ou moins conductrices ou par l'attraction qu'exerce sur elle l'électricité contraire d'un corps rapproché. Nous trouvons ici une confirmation des objections que nous avions présentées contre le rôle qu'on a longtemps attribué à la pression atmosphérique, en la regardant comme la cause qui maintient l'électricité à la surface des corps conducteurs.

Avant de terminer ce paragraphe, nous avons encore à parler de quelques phénomènes qui se rattachent à cette action en vertu de laquelle l'électricité, en se propageant et probablement pour se propager, déplace, désagrége et transporte souvent les particules des corps ; en un mot, altère leur état moléculaire. Ces phénomènes sont nombreux et variés, et quoiqu'ils accompagnent presque toujours les autres effets de la transmission de l'électricité à travers les corps, ils doivent être étudiés d'une manière distincte, parce qu'ils en sont jusqu'à un certain point indépendants, qu'ils en sont même quelquefois isolés, et qu'ils sont liés d'une manière plus intime au mode même de propagation de cet agent.

M. Fusinieri a constaté d'une manière évidente, par un grand nombre d'expériences, le transport des molécules métalliques qui a lieu d'un conducteur à l'autre quand on fait passer entre ces deux conducteurs la décharge d'une bouteille de Leyde, ou même la simple étincelle d'une machine électrique. Ainsi des particules d'argent sont transportées sur du cuivre et peuvent même le pénétrer, et réciproquement le cuivre est transporté sur de l'argent. Parmi les expériences qui prouvent que des particules métalliques désagrégées peuvent, sous l'influence de la décharge électrique, pénétrer un autre métal sans être arrêtées par lui, nous citerons la suivante. Un disque d'argent, bien décapé, de l'épaisseur d'une feuille de carton et de 9 centimètres de diamètre environ, est

mis en contact, par son centre, avec une boule d'or d'un centimètre et demi de diamètre, qui elle-même communique avec l'une des armures d'une batterie composée de deux grandes bouteilles de Leyde; l'autre armure communique avec une boule d'argent qu'on rapproche assez du disque pour que l'étincelle passe entre eux. Quand on a ainsi fait passer plusieurs décharges, on remarque sur la surface du disque d'argent d'où est sortie l'étincelle une belle tache d'or, soit une lame très-mince de ce métal, dont la formation exige que l'or ait traversé l'argent sans se mélanger avec lui. Sur l'autre surface d'argent, et précisément à son point de contact avec l'or, on trouve une petite cavité circulaire qui semble présenter quelques traces de fusion. On observe également que de l'argent a été transporté sur l'or, mais il ne s'étend pas aussi bien que l'or, qui est de tous les métaux celui qui forme la tache la plus grande et par conséquent la plus mince, probablement à cause de sa grande ductilité.

Mais les effets de ce genre les plus remarquables sont ceux observés par Karsten et par plusieurs autres physiciens, et désignés sous le nom de figures et images électriques. Il ne faut pas les confondre avec les figures ou dessins qu'on peut former en électrisant certains points des plaques isolantes et en les saupoudrant ensuite avec certaines poudres ou poussières qui reproduisent les figures qu'on avait tracées avec l'électricité. Telles sont les figures de Lichtemberg, dans lesquelles la poudre elle-même est électrisée, ce qui fait mieux ressortir les images et permet de distinguer celles qui sont tracées avec l'électricité positive et celles qui le sont avec la négative. Telles sont aussi les figures qu'on obtient en recouvrant un plateau d'une poudre isolante non électrisée, et en promenant normalement sur le plateau la pointe d'une tige métallique tenue en communication avec le bouton d'une bouteille de Leyde chargée. De cette manière une partie de l'électricité passe au plateau, une autre à la poudre, de sorte que les traits dessinés par la pointe et la poudre sont semblablement électrisés, et que la figure est ainsi tracée par des lignes d'où la poudre est chassée. C'est par ce moyen que Wiedemann, comme nous l'avons

vu[1], avait constaté la différence de conductibilité que présentent certains cristaux, suivant que l'électricité s'y propage dans une direction ou dans une autre. Ces figures fournissent aussi des différences assez caractéristiques entre l'électricité positive et la négative, et nous y reviendrons quand nous étudierons ces différences en nous occupant de la lumière électrique. C'est pour le moment d'images électriques d'une autre espèce que nous avons à nous occuper, c'est-à-dire de celles qui sont dues, non pas à une simple attraction exercée sur des substances pulvérulentes par l'électricité restée adhérente, suivant certaines directions, à des plaques isolantes, mais à une modification moléculaire permanente produite dans les corps conducteurs aussi bien que dans les non-conducteurs, par l'effet du passage de l'électricité.

Moser avait découvert, en 1842, le fait remarquable que si deux corps sont en contact ou très-rapprochés, ils impriment leur image l'un sur l'autre. Ainsi il suffit de placer une médaille ou une pièce de monnaie sur une plaque métallique bien polie et de l'y laisser quelque temps (20 minutes environ) pour que cette plaque garde l'empreinte de la médaille ou de la pièce de monnaie. L'effet dans ce cas est peu marqué, mais il devient beaucoup plus sensible si on expose la plaque à la vapeur de mercure ou à la vapeur d'eau telle que celle que produit l'haleine, ces vapeurs se condensant de manière à dessiner nettement les contours de l'image. Si la plaque est d'argent et qu'elle soit iodurée, on obtient alors une image bien plus nette. Ce qu'il y a de remarquable, c'est que ces expériences réussissent aussi bien dans une obscurité complète et pendant la nuit que sous l'influence de la lumière. Aussi Moser avait-il attribué cette classe de phénomènes à une action particulière des rayons obscurs les plus réfrangibles, partant du principe que tous les corps rayonnent de la lumière, même dans une obscurité complète; et il avait considéré cette action comme consistant à modifier les substances de telle sorte qu'après l'avoir éprouvée, elles condensent les diverses vapeurs autre-

[1] Tome II, page 74.

Digitized by Google

ment qu'elles ne le feraient sans cela, la découverte de Daguerre n'étant plus qu'un cas particulier de cette action générale.

Karsten réussit, peu de temps après la découverte de Moser, à produire des figures semblables, dans des circonstances analogues, en se servant de l'électricité. Il plaçait une pièce de monnaie sur une lame de verre, qui reposait elle-même sur une plaque de métal, puis il faisait arriver sur la monnaie des étincelles électriques qui se déchargeaient sur la plaque de métal, en faisant le tour de la lame de verre. Au bout de cent tours de la machine électrique, la pièce de monnaie était enlevée, et en soufflant l'haleine sur la plaque de verre qui semblait n'avoir éprouvé aucune altération, on voyait reparaître l'empreinte entière de la pièce avec ses plus petits détails. En employant des lames de verre minces, on peut en superposer un grand nombre les unes sur les autres, et on obtient alors sur chacune des figures de la médaille, faibles, il est vrai, et qui deviennent de moins en moins distinctes, mais qui pourtant sont toujours reconnaissables. En général, la figure est d'autant plus nette que l'espèce de bouteille de Leyde, formée par la réunion de la médaille et de la lame de métal, se décharge plus fréquemment d'une manière spontanée et continue, de manière à produire comme une auréole rayonnante autour de la pièce de monnaie.

L'effet que nous venons de décrire n'est nullement dû à des traces d'électricité restées adhérentes à la plaque de verre après qu'on a fait passer l'étincelle. C'est ce qu'il est facile de prouver en frottant la plaque avec un morceau d'étoffe ou en la laissant exposée quelque temps à l'air, ce qui fait disparaître toute électricité; et cependant la figure persiste avec la même netteté; on a même de la peine à la faire disparaître en chauffant ou en soufflant dessus. Mais la preuve la plus forte, c'est qu'on peut produire la même figure sur des lames de métal polies, cas dans lequel il est impossible d'admettre qu'il y ait de l'électricité adhérente. Pour bien réussir, il faut empêcher l'électricité de passer trop vite de la pièce de monnaie à la plaque métallique qui doit en recevoir l'empreinte, et pour cela il faut, au lieu de les mettre immédiatement en contact, les séparer par une mince lame de verre, ou mieux encore par une

légère feuille de mica. On obtient ainsi déjà au bout de 15 ou 20 tours du plateau de la machine, c'est-à-dire en 10 ou 15 secondes, une figure d'une netteté extraordinaire. Plus le corps est mince, et par conséquent plus les deux électricités contraires sont dissimulées, plus sont grandes la netteté et la rapidité avec lesquelles la figure se forme. On peut varier la nature de la plaque destinée à recevoir les images et les objets eux-mêmes dont on veut obtenir les figures. Karsten a employé également des monnaies et des médailles de divers métaux, des cachets, des pierres gravées etc.; cependant les résultats les plus sûrs sont ceux qu'on obtient avec diverses pièces de monnaie, à cause de l'uniformité de l'empreinte. Quant aux plaques, les plus conductrices sont les meilleures; et même en employant une lame d'argent semblable à celle dont on se sert pour le daguerréotype, on obtient sur cette lame, après un grand nombre de tours de la machine, une empreinte de la médaille et de la feuille de mica bien visibles, sans qu'on soit obligé de les faire paraître au moyen des vapeurs. Après mille tours de la machine, la figure entière était reproduite sur la lame comme elle l'aurait été à l'eau forte, et elle présentait une couleur brunâtre.

Les phénomènes observés par Karsten ont une grande ressemblance avec ceux découverts par Moser, lors même qu'ils sont produits d'une manière bien différente. Les modifications éprouvées par les surfaces qui reçoivent l'empreinte des médailles et autres objets paraissent être dans les deux cas de même nature; mais quelle est cette nature, telle est la question qui se présente.

Riess avait déjà remarqué, avant les expériences de Karsten, qu'on peut produire des figures sur des lames de verre et de mica au moyen de décharges électriques ou de simples étincelles, c'est-à-dire déterminer sur la surface de ces lames des traces, des dessins ramifiés qui deviennent visibles si l'on projette l'haleine, et qu'il avait nommés par cette raison figures roriques. En examinant de près des morceaux de mica, il s'était assuré qu'une lame de cette substance exposée au souffle de l'haleine ou tenue sur l'eau en évaporation, se recouvre d'un dépôt de gouttelettes qui ne forment point une couche continue,

tandis que cette couche est continue et parfaitement transparente au lieu d'être trouble, si la surface du mica est fraîche et n'a pas été déjà exposée à l'air [1]. On pourrait croire que la surface renouvelée n'est pas recouverte d'eau; bien au contraire, c'est parce qu'elle a une grande affinité pour l'eau qu'elle la condense en une couche continue, ce que prouvent et la grande conductibilité électrique qu'elle acquiert, et l'inspection qu'on peut en faire au moyen du microscope, qui fait voir en même temps ces gouttelettes isolées sur la partie où la surface n'est pas fraîche. D'ailleurs, en l'exposant à l'action de substances desséchantes ou à celle du vide, la surface devient isolante par l'effet de la disparition de la mince couche d'eau. La différence entre la surface ancienne et la surface fraîche du mica tient à ce qu'il s'est formé sur la première une couche étrangère par l'effet de dépôts de substances diverses, principalement organiques, qui se trouvent suspendues dans l'atmosphère, couche qui n'a pas eu le temps de se former sur la surface renouvelée. C'est la présence de cette couche légèrement graisseuse qui oblige l'eau à se déposer sous forme de gouttelettes, au lieu de former un dépôt continu.

L'action de la décharge des étincelles consisterait donc à éloigner la couche étrangère partout où l'électricité a passé, et la différence dans la manière dont l'haleine se dépose là où cette couche existe et là où elle a disparu, rendrait ainsi visibles les traces de l'électricité. Cependant la surface du mica, comme celle du verre, peut bien elle-même être modifiée assez profondément par l'effet des décharges, comme nous l'avons déjà vu, ce qui explique la persistance des figures qui durent quelquefois plusieurs années.

Revenant aux figures électriques de Karsten, il faut remarquer qu'on a deux séries de décharges, celles qui ont lieu dans un sens quand on charge le modèle qui est placé sur la lame isolante, et celles qui ont lieu quand l'électricité du modèle et celle de la plaque inférieure se neutralisent. Or ces deux effets

[1] Il est facile de rafraîchir la surface d'une lame de mica en en détachant une lamelle mince avec la lame d'un canif.

se succédant très-rapidement, il en résulte un enlèvement de la couche étrangère dans les parties de la lame isolante correspondantes aux points les plus rapprochés et par conséquent les plus saillants du modèle. On peut même rendre sensible cet effet en remplaçant cette lame métallique inférieure par une surface de résine bien unie, et on y découvre l'image du modèle au moyen d'une poudre fine qui se dépose là où l'électricité a laissé ses traces. L'image produite sur la lame de métal tient également à l'enlèvement d'une couche étrangère analogue à celle dont le mica est recouvert, enlèvement qui s'opère partout où les décharges ont passé. C'est ce que prouve l'influence du poli qui consiste moins à purifier le métal qu'à revêtir sa surface d'une substance étrangère parfaitement uniforme. C'est ce que prouve également l'expérience de M. Fizeau dans laquelle une lame de platine, après avoir été très-bien polie avec du coton imprégné d'un mélange de potée d'étain et d'alcool, donnait d'excellentes images, et n'en donna plus après avoir été purifiée par l'incandescence et son immersion successive dans l'eau acidulée et dans l'eau pure au point de pouvoir enflammer le gaz hydrogène. D'ailleurs Karsten, regardant au microscope les images qui sont produites par l'haleine sur une surface métallique, a reconnu très-bien qu'elles proviennent du dépôt d'une couche d'eau mince et continue qui a lieu dans les points où les dépôts étrangers ont été enlevés. Il a également constaté que l'image qu'on a déterminée sur une lame de laiton s'y reproduit par un dépôt de cuivre, quand on plonge la lame dans une solution de sulfate de cuivre comme électrode négatif; preuve que les traits de l'image correspondaient sur la surface de laiton aux points où la couche étrangère avait été enlevée.

C'est par la même raison que les lames de mica sur lesquelles la reproduction des images se fait le mieux, sont celles dont la surface est très-ancienne et qui n'ont pas été rafraîchies depuis longtemps, ni par l'électricité, ni par l'action mécanique.

Toutefois, il nous paraît impossible d'expliquer dans tous les cas la formation des figures électriques, uniquement par le rôle attribué à cette couche organique qui existe à la surface des corps, en particulier quand ces figures sont visibles immédiate-

ment, aussi bien sur les lames isolantes que sur les plaques métalliques, sans le secours de la vapeur. On est obligé d'admettre qu'il s'opère sur les surfaces une véritable modification moléculaire; et la preuve, c'est que les images ne sont pas seulement superficielles et passagères, mais qu'elles pénètrent quelquefois assez profondément et sont très-durables. Or, il est assez probable que dans les expériences de Karsten, la polarisation moléculaire, qu'éprouve la substance isolante placée entre les deux plaques métalliques, doit être accompagnée d'un changement dans la position des particules là où l'action électrique est le plus forte, c'est-à-dire dans les points correspondants aux parties les plus saillantes de l'objet en relief. De même quand les décharges s'opèrent, les particules de la plaque métallique inférieure doivent, dans les points où elles sont le plus rapprochées du relief, subir également un changement moléculaire, dont l'effet est une altération superficielle très-légère, il est vrai, mais pourtant sensible. Il se pourrait aussi que dans quelques cas le passage prolongé de décharges électriques successives fût accompagné de quelques effets électro-chimiques, et en particulier d'une oxydation dans les parties des surfaces métalliques les plus rapprochées des points saillants de la médaille.

Quant aux figures de Moser, elles me semblent avoir la même origine que celles de Karsten, ainsi que nous l'avons dit plus haut. L'apparence et les propriétés de ces deux sortes d'images sont tellement semblables qu'il serait difficile de les attribuer à des causes différentes. Les images de Moser ne peuvent se former sur une plaque de métal à travers une lame de mica; il faut que la plaque et l'objet soient, sinon en contact, du moins à une très-petite distance, circonstances toutes défavorables à l'hypothèse que les figures sont produites par un rayonnement invisible. Ce qui prouve que l'électricité semble jouer un rôle dans leur production, c'est que, suivant l'observation de Karsten, si on pose une pièce d'argent sur une plaque de laiton, en ayant soin de les faire communiquer au moyen d'une bande de cuivre placée tout autour à l'extérieur, on obtient une image excellente, tandis que l'image est très-mauvaise quand on n'a pas soin de mettre la bande de cuivre. Dans

Digitized by Google

le premier cas, on a un véritable couple, dans lequel l'air, plus ou moins humide, interposé entre la plaque de laiton et la pièce d'argent, joue le rôle de conducteur humide, d'où résulte que la surface de laiton doit être oxydée dans tous les points où elle n'a pas été en contact avec la pièce. Dans le second cas, la neutralisation des électricités ayant lieu par les points de contact de la plaque et de la pièce, l'effet doit être plus confus que lorsqu'elle s'opère régulièrement par l'intermédiaire de la lame de cuivre qui unit les deux lames métalliques.

La nécessité d'une couche d'air interposée pour la production des images de Moser a été prouvée par Knorr, qui a démontré que dans de l'eau très-pure et privée d'air, comme dans le vide, les images ne se formaient pas ou que très-difficilement. Ce fait est favorable à l'explication que nous venons de donner; mais il n'en est pas moins difficile d'expliquer la formation des images de Moser quand les deux lames métalliques ne se touchent pas. Toutefois, il n'est pas impossible qu'à la distance nécessairement très-petite où ces lames sont placées l'une par rapport à l'autre, l'électricité, développée sur l'une d'elles par l'action de l'air humide, étant condensée par l'influence de l'autre lame, ne soit capable de produire les effets suffisants pour déterminer la formation des images. Nous verrons dans la partie consacrée aux sources de l'électricité des exemples de dégagement d'électricité dans des conditions semblables.

Nous ne nous arrêterons pas aux autres explications qu'on a cherché à donner des images de Moser, celles en particulier de Hunt et de Knorr qui les attribuent à une cause calorifique, et, suivant Knorr, à une transmission réciproque de chaleur entre la plaque et l'objet. Ce dernier physicien obtient en effet, en chauffant les plaques, des images qu'il appelle thermographies et qui sont évidemment dues à une oxydation, puisqu'on ne peut les produire avec des plaques de platine et d'or. L'action de la chaleur consiste surtout à manifester les différences préexistantes dans l'état moléculaire d'une surface métallique, probablement parce que ces différences en déterminent de correspondantes dans l'oxydation qu'éprouve cette surface par l'élévation de la température. Ainsi la chaleur fait

reparaître l'image effacée d'une plaque de daguerréotype et l'empreinte disparue d'une pièce de monnaie dont la surface bien polie ne laisse plus voir aucun signe ni aucune figure. Dans tous ces cas, la chaleur ne détermine pas la formation de l'image, mais simplement en rend la manifestation sensible.

Sans entrer dans plus de détails sur ce sujet intéressant qui a été l'objet des recherches d'un grand nombre de savants [1], nous nous résumons en émettant l'opinion que la formation de l'image est dans tous les cas un effet électrique dû à l'influence que la transmission de l'électricité exerce sur l'état moléculaire des corps, soit en dispersant les particules quand elles lui font obstacle, soit en les modifiant physiquement ou chimiquement, quand elles lui livrent passage. Nous nous appuyons : 1° sur le fait que la manière la plus certaine et la plus efficace d'obtenir les figures sous toutes les formes, est d'employer les décharges électriques ; 2° sur la circonstance que dans tous les cas où l'on produit les figures sans l'intervention directe de l'électricité, les conditions les plus favorables à cette production sont en même temps celles qui le sont également à un dégagement d'électricité.

Nous ne parlerons pas ici des autres figures ou images qu'on peut produire au moyen de l'électricité, telles que les anneaux de Priestley et ceux de Nobili, vu que les premiers sont dus à la chaleur qui accompagne l'étincelle électrique, et que les seconds sont l'effet d'une décomposition électro-chimique; leur étude trouvera donc naturellement sa place dans les deux chapitres suivants qui sont consacrés aux effets calorifiques et chimiques de l'électricité en mouvement.

§ 7. Vitesse de propagation de l'électricité.

Immédiatement après la découverte de la bouteille de Leyde, on avait constaté la rapidité prodigieuse avec laquelle se propage la décharge électrique, soit en la faisant passer à travers une file nombreuse d'hommes qui se tenaient tous par la main,

[1] Nous regrettons en particulier de ne pas parler des recherches de M. Masson, ainsi que de celles de M. Morren, qui du reste sont de nature à confirmer les idées que nous avons émises sur la cause de ces phénomènes.

soit en la transmettant au travers d'une longueur de deux milles dans la Tamise, espace qu'elle parcourait instantanément. L'expérience la plus exacte fut celle faite par Watson, le 5 août 1748. L'arc de clôture des deux armures d'une bouteille de Leyde était formé par un fil de fer long de 12276 pieds anglais, supporté en plein air par des supports isolants en bois sec, et disposé de telle sorte que ses deux extrémités et son milieu se trouvassent dans la même chambre où était la bouteille de Leyde et la machine électrique. Le fil était interrompu au milieu de sa longueur, et cette solution de continuité était remplie par le corps de l'observateur qui tenait entre ses mains les deux bouts du fil séparés par cette interruption. Au moment de la décharge, l'observateur voyait l'étincelle qui s'échappait entre l'une des extrémités du fil et l'armure intérieure de la bouteille, en même temps qu'il sentait la secousse produite par cette décharge, et il ne put jamais apercevoir le moindre intervalle entre les deux sensations, d'où l'on conclut que la rapidité de la propagation à travers le fil était incommensurable.

Longtemps après ces premiers essais, en 1834, Wheatstone reprit l'examen de cette question d'après un procédé très-ingénieux et applicable à un grand nombre d'autres recherches. Ce procédé est fondé sur les effets de la réflexion d'un point lumineux éloigné, par un miroir plan circulaire traversé par un axe horizontal situé dans son plan et passant par son centre, autour duquel il tourne avec une très-grande rapidité (fig. 190). E est le miroir fixé à l'axe horizontal GF porté par les deux supports en laiton I et H. L'image du point lumineux, d'après la loi de la réflexion, décrit un arc d'un nombre de degrés double de celui que décrit le miroir dans le même temps, c'est-à-

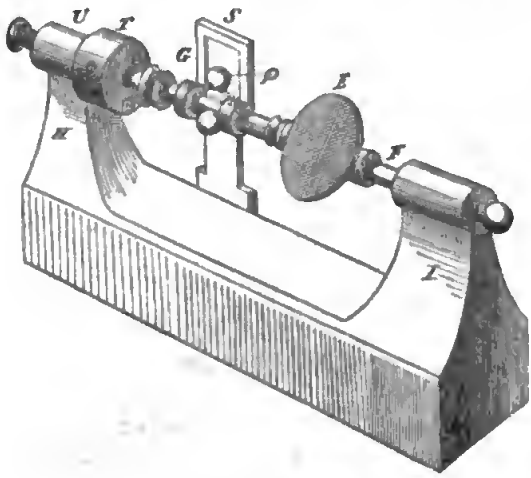


Fig. 190.

dire dans le temps employé par le miroir à passer de la position où l'image du point lumineux a été visible pour l'œil immobile de l'observateur, à celui où elle cesse de l'être. Si la durée de la lumière du point est moindre que le temps employé par le miroir à passer de l'une de ces positions à l'autre, l'arc lumineux n'aura pas la longueur que nous venons de lui assigner, en supposant cette lumière permanente. Si même cette durée était nulle et s'il arrivait que la lumière fût complètement instantanée, l'arc se réduirait à un point. Or, lorsque le point lumineux est une étincelle électrique provenant d'une décharge opérée dans l'air entre deux conducteurs, l'image, qui n'est effectivement qu'un point pour une vitesse du miroir de 50 tours par seconde, devient un arc pour une vitesse plus grande, preuve que la lumière de l'étincelle a une certaine durée. Si l'on estimait la vitesse de rotation du miroir, c'est-à-dire le nombre de tours qu'il fait dans une seconde, on pourrait, en mesurant avec un cercle divisé le nombre de degrés occupés par l'image, déterminer le temps de la durée de l'éclairement produit par la décharge électrique, ou, ce qui revient au même, le temps de la durée de cette décharge. Ainsi Wheatstone, ayant trouvé cet arc de 24° pour une rotation du miroir de 800 tours par seconde, en conclut une durée de $\frac{24}{720 \times 800} = \frac{1}{24000}$ de seconde. En effet, dans le temps où le miroir en tournant parcourt 360°, l'image du point lumineux en parcourt 720; or, comme le miroir fait 800 tours dans la seconde, l'image parcourt $720° \times 800$, soit 576000° dans une seconde; mais comme elle-même a 24° de longueur, il faut qu'elle ait duré pendant le temps exprimé par $\frac{24}{576000}$, soit $\frac{1}{24000}$.

Ainsi le premier résultat obtenu par Wheatstone est que la décharge qui produit l'étincelle électrique n est pas complétement instantanée, mais qu'elle a une durée excessivement courte, il est vrai, susceptible cependant d'être évaluée.

Ce point établi, voici comment le physicien anglais s'y prit pour déterminer la durée de la propagation dans un bon con-

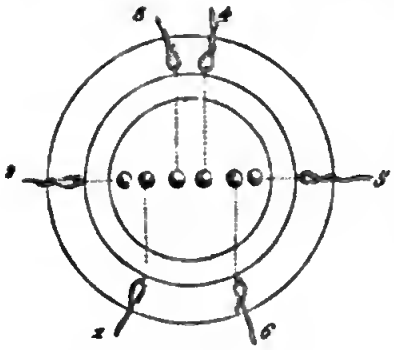


Fig. 191.

ducteur, tel qu'un fil métallique. Il construisit un appareil qu'il nomma planche à étincelle *(spark board)* (fig. 191), qui consiste en un disque en bois sur lequel sont placées sur une même ligne horizontale six boules en cuivre, combinées de façon à ce qu'une même décharge électrique puisse donner lieu à trois étincelles. Ainsi la boule d où part le fil n° 1 communique directement avec l'armure intérieure de la bouteille, dont la décharge passant à la boule voisine va de cette boule par le fil 2 uni au fil 3 à la troisième boule; de là elle passe à la quatrième boule dont le fil 4 la conduit à la boule du fil 5, pour traverser jusqu'à la boule dont le fil 6 est en communication avec l'armure extérieure de la bouteille. Les boules de chacun des trois systèmes ne sont qu'à 2 millimètres et demi de distance l'une de l'autre, ce qui constitue la distance de parcours pour chacune des trois étincelles; la planche circulaire à étincelle a elle-même 7 centimètres et demi de diamètre. Maintenant les fils 2 et 3, ainsi que les fils 4 et 5, au lieu d'être mis immédiatement en communication, sont réciproquement réunis par un fil conducteur de cuivre de 1^{mm} 7 de diamètre et de $\frac{1}{4}$ de mille de longueur[1], ce qui fait en tout une longueur de $\frac{1}{2}$ mille entre la boule n° 2 et la boule n° 5, longueur interrompue dans son milieu par les boules n°s 3 et 4. Ainsi la décharge, produisant dans le trajet trois étincelles, a à parcourir, en supposant qu'elle parte de l'armure intérieure, un fil de cuivre de $\frac{1}{4}$ de mille de longueur entre la première et la deuxième étincelle, et un fil de cuivre de $\frac{1}{4}$ de mille aussi de longueur entre la deuxième et la troisième. Si la vitesse de propagation dans ces longs conducteurs est appréciable, l'apparition des trois étincelles ne doit pas être simultanée; or l'expérience montre que l'étincelle du milieu est retardée par

[1] Soit 402 mètres et par conséquent 804 mètres pour un demi-mille.

rapport aux deux extrêmes, preuve donc que la propagation de l'électricité n'est pas instantanée et qu'elle a lieu des extrémités du conducteur qui réunit les deux armures jusqu'à son milieu.

Voici comment Wheatstone dispose l'expérience pour obtenir ce résultat et pour mesurer la vitesse de propagation.

L'appareil de la figure 190 est placé à l'extrémité d'une planche d'acajou (fig. 192) sur laquelle se trouve une roue K

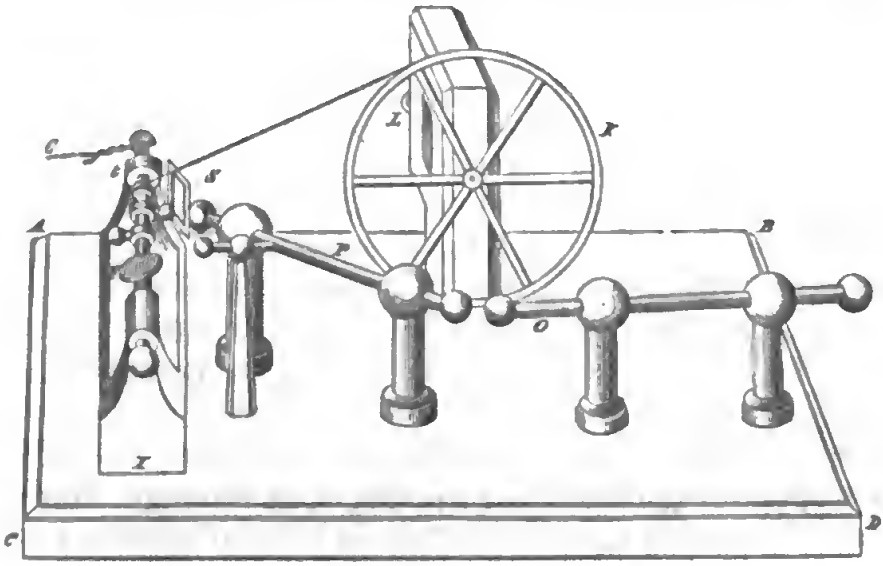


Fig. 192.

qui communique son mouvement à l'axe à l'aide d'un fil qui passe dans les gorges creusées sur la circonférence des deux pièces. Dans l'appareil de M. Wheatstone, le système des roues était tellement disposé que l'axe portant le miroir eût dû exécuter 1800 révolutions pour une de la roue, s'il n'y eût eu aucun retard provenant du glissement du fil. Un déchargeur OP est en communication par son extrémité avec l'armure intérieure d'une bouteille de Leyde, qui est constamment électrisée à l'aide d'une machine électrique; l'armure extérieure de la même bouteille communique avec le fil n° 1 de la planche à étincelles, et le fil n° 6 aboutit à un renflement du support en laiton sur lequel tourne l'axe du miroir. Ce même axe porte un bras Q(fig. 190) qui tourne avec lui et qui, à chaque révolution, est ramené vis-à-vis du bouton de l'excitateur, ce qui détermine

la décharge, laquelle, transmise à travers le circuit, passe entre les deux boules de l'excitateur, dont la distance est réglée pour cela, puis de l'extrémité de sa tige P au bouton du bras Q, et de là à travers l'axe du miroir à la planche à étincelles où l'œil voit les trois étincelles. La planche elle-même est placée verticalement à une distance de trois mètres du miroir, et de façon que celui-ci soit sur le même niveau que la ligne horizontale sur laquelle sont situées les trois étincelles. Le bras Q est disposé de manière que la décharge ait lieu, et que par conséquent les étincelles paraissent au moment où le miroir fait un angle de 45° avec l'horizon, ce qui fait que l'œil de l'observateur placé du côté de I, regardant directement de haut en bas, voit les images réfléchies des trois étincelles sur un plan horizontal. On peut placer au-dessus du miroir un verre plan pour empêcher l'œil de s'approcher trop du miroir. Pour mieux régulariser l'instant des décharges qui doivent avoir lieu au moment où le miroir est incliné de 45°, on interpose une plaque de mica S percée d'une très-petite ouverture horizontale parallèle à l'axe de l'excitateur, ce qui fixe entre des limites très-rapprochées la possibilité de la décharge. Aussi, quelle que soit la rapidité avec laquelle le miroir se meuve, les étincelles sont généralement dans le champ de la vue.

Il y a, comme on le comprend, une grande importance à déterminer exactement la vitesse de rotation de l'axe qui porte le miroir. M. Wheatstone y est parvenu d'abord en calculant le ton du son produit par la succession des coups reçus par une petite bande de papier ou de carte attachée au bras Q, qui à chaque révolution de l'axe éprouve un choc. Lorsque la machine avait sa vitesse maximum on obtenait un sol dièze de la quatrième octave, ce qui correspondait à 800 révolutions du miroir par seconde. Plus tard, M. Wheatstone a réussi à munir l'instrument d'un compteur destiné à enregistrer le nombre des tours. Il est vrai que l'augmentation de la résistance au mouvement qui résulte de cette addition fait que le miroir ne peut pas exécuter plus de 600 révolutions par seconde.

En opérant au moyen de l'appareil disposé comme nous venons de l'indiquer, on voit, dès que la vitesse du miroir dé-

passe une certaine limite, les trois étincelles s'allonger en trois lignes parallèles d'autant plus longues que le mouvement est plus rapide. Ces lignes sont des arcs de cercle dont les centres sont situés sur l'axe du miroir; la plus grande amplitude qu'on leur ait trouvée a été de 24°, ce qui, à 800 révolutions du miroir par seconde, correspond à une durée de l'étincelle de $\frac{1}{24,000}$ de seconde, comme nous l'avons vu. Quant à la position relative des trois images, lorsque la vitesse est encore faible, leurs points extrêmes paraissent être exactement dans la même verticale, et ont cette apparence ; mais dès que la vitesse devient considérable, si le miroir tourne de gauche à droite par rapport à l'observateur placé en I, les lignes prennent l'apparence ; et s'il tourne de droite à gauche, elles prennent l'apparence ; ce qui indique dans les deux cas également que l'étincelle du milieu s'est montrée après les deux extrêmes, et qu'elle a également disparu après elles. En effet, dans le premier cas, le miroir ayant dépassé les 45° du côté de la verticale quand l'étincelle du milieu se montre, il est clair que le commencement de son image doit se trouver en arrière du commencement de celles des deux autres étincelles qui ont apparu au moment où le miroir était à 45°; ce doit être l'inverse dans le cas où le miroir tourne de droite à gauche. M. Wheatstone a réussi à évaluer approximativement à un demi-degré la quantité dont l'image du milieu est en arrière ou en avant des deux autres. Cet arc d'un demi-degré correspond à une durée de $\frac{1}{2 \times 360 \times 1600} = \frac{1}{1,152,000}$ de seconde; l'espace parcouru dans cette portion de seconde étant de $\frac{1}{4}$ de mille, soit 1320 pieds anglais, cela donne une vitesse de 288,000 milles par seconde. Telle serait donc la vitesse de propagation de l'électricité dans un fil de cuivre, vitesse supérieure à celle de la lumière dans l'espace planétaire, qui n'en est que les $\frac{2}{3}$.

L'expérience de Wheatstone prouve en outre que dans un fil qui communique par ses extrémités avec les armures d'une

bouteille de Leyde, le dérangement électrique se propage à partir des deux bouts du fil avec une égale vitesse, et reste un certain temps, très-court il est vrai, mais cependant appréciable, à arriver jusqu'au milieu du circuit. Nous reviendrons plus loin, en nous occupant de la lumière électrique, sur celles des expériences de Wheatstone qui concernent la durée de l'étincelle.

De nouvelles recherches sur la vitesse de l'électricité, faites avec des courants voltaïques transmis à travers les fils des télégraphes, ont donné des résultats bien différents de ceux qu'avait obtenus Wheatstone avec l'électricité ordinaire. Ainsi, M. Walker de Washington avait trouvé que cette vitesse, dans un fil de fer de 3 millimètres de diamètre, était de 18,760 milles par seconde, et M. Mitchell avait trouvé 28,526; vitesses, toutes les deux, bien inférieures à celle de 288,000 qu'avait trouvée Wheatstone.

Plus tard, M. Gould profita d'un circuit voltaïque colossal, de 1045 milles (1672 kilomètres), établi entre la station de Seaton, au nord du Capitole de Washington, et la ville de Saint-Louis, avec plusieurs stations intermédiaires telles que Pittsburg, Cincinnati, pour déterminer la vitesse de propagation du courant, d'après une méthode toute différente, et il trouva 12,851 milles par seconde et 15,830 (25,600 kilomètres), en ne se servant que des expériences faites à une température inférieure à celle de la congélation de l'eau, l'isolement n'étant pas suffisant aux températures plus élevées. La méthode de M. Gould consistait à avoir un crayon articulé sur un morceau de fer doux qui, lorsqu'il appuie sur un papier blanc enroulé autour d'un cylindre auquel un mécanisme d'horlogerie imprime un mouvement uniforme de rotation, y dépose un trait régulier. Le morceau de fer doux est attiré par les pôles d'un électro-aimant entouré d'un fil dont l'un des bouts se rend à la roue d'échappement d'une pendule à secondes. Cette roue interrompt périodiquement le circuit, ce qui produit, par l'action de l'électro-aimant sur l'armure, des intermittences d'attraction qui se traduisent par des interruptions égales et équidistantes du trait sur le papier. Un appareil semblable étant disposé

dans chacune des stations consécutives, ils fonctionnent tous au moyen d'un courant unique qui parcourt leur circuit commun. M. Gould s'assura d'abord que la différence d'intervalles entre les traits aux différentes stations, correspondait bien à leur éloignement du lieu où le signal était donné, et qu'elle était proportionnelle au temps employé par le courant à parcourir le double [1] de la distance entre les stations. En comparant ainsi les registres de chaque station, y compris celle d'où partait le courant, il parvint au résultat que nous avons indiqué.

MM. Fizeau et Gonnelle avaient obtenu des résultats bien différents, en opérant encore d'une autre manière. Le principe de leur méthode consistait à interrompre un courant à des intervalles de temps très-rapprochés, et simultanément dans deux points d'un long conducteur très-éloignés l'un de l'autre. Ces interruptions s'opéraient au moyen d'une roue portant sur sa circonférence un nombre de divisions égales alternativement en bois et en métal, comme les rhéotomes que nous avons déjà décrits [2]; il était facile de disposer ces appareils de façon que le circuit fût interrompu à deux ou plusieurs endroits, et que les interruptions fussent bien simultanées là où elles avaient lieu. Un galvanomètre placé dans le circuit ne recevait ainsi que des courants discontinus; néanmoins, lorsque les interruptions se succédaient rapidement, l'aiguille de l'instrument était déviée d'une manière stable, comme si le courant eût été continu. Seulement l'amplitude des déviations variait avec le nombre des interruptions qui avait lieu dans un temps donné, et atteignait un maximum pour un certain nombre d'interruptions en même temps qu'elle avait un minimum pour un autre. Si la propagation du courant dans un long conducteur est instantanée, il est clair que le fait que le circuit éprouve des interruptions simultanées aux deux extrémités de ce conducteur, ne doit rien changer à la déviation du galvanomètre, qui reste la même que s'il n'y avait d'interruptions qu'en un point du circuit. Mais si

[1] Le *double*, à cause de l'obligation du courant à revenir à son point de départ.

[2] Tome I, page 298 (fig. 130) et page 299 (fig. 131), page 402 (fig. 154).

la propagation exige un certain temps pour s'opérer, il ne peut plus en être ainsi, vu qu'au même moment où l'interruption a lieu au point de départ du courant, elle a lieu aussi à l'autre extrémité du conducteur, où ce même courant n'est pas encore arrivé. Lors donc qu'il y arrive il ne trouve plus l'interrupteur dans la même disposition; et la déviation du galvanomètre en éprouve une diminution. Il en résulte que la vitesse de propagation devra donner naissance à des changements périodiques dans les déviations correspondantes à des vitesses de rotation des rhéotomes de plus en plus grandes, et que par conséquent on pourra de ces changements déduire la vitesse elle-même. C'est ce qu'ont fait MM. Fizeau et Gonnelle en se servant pour leurs expériences des fils télégraphiques de Paris à Rouen et de Paris à Amiens. Les deux fils de chacune de ces lignes pouvaient être réunis pour la première à Rouen et pour la seconde à Amiens; ils présentaient ainsi une longueur de 314 kilomètres pour la ligne d'Amiens et de 288 pour celle de Rouen. En opérant suivant la méthode que nous venons d'indiquer, au moyen de ces longs conducteurs dont l'un était en fer et l'autre en cuivre, les deux physiciens sont arrivés à admettre que la vitesse de propagation de l'électricité est indépendante de l'intensité du courant et de la section du conducteur, mais non de sa nature, et qu'elle est de 100,000 kilomètres par seconde dans un fil de fer et de 180,000 dans un fil de cuivre. M. Latimer Clark avait déjà observé, en opérant avec des piles dont le nombre des couples variait de 31 à 500, et sur une longueur de fils de 768 milles anglais (1236 kilom.), que les courants se propagent, quelle que soit leur intensité, avec la même vitesse.

C'était au moyen d'observations astronomiques que M. Walker, en Amérique, s'était déjà assuré, comme nous l'avons vu, que le courant voltaïque reste un temps appréciable à se propager dans un long conducteur. En se servant du courant pour déterminer la différence de longitude entre deux stations, il avait constaté que cette propagation n'est pas instantanée; ainsi, entre Philadelphie et Cambridge, le calcul montrait que le courant parti de l'une des deux villes, au moment du passage d'une étoile, n'arrivait pas à l'autre dans le même instant, et qu'il

fallait tenir compte du temps écoulé, qui était dans ce cas de $\frac{11}{20}$ de seconde, pour la détermination de la différence en longitude. La comparaison de plusieurs observations faites entre les trois stations de Washington, de Philadelphie et de Cambridge avait conduit M. Walker à une vitesse de 30,000 kilomètres par seconde. M. Mitchell, de l'observatoire de Cincinnati, à la suite de nombreuses épreuves sur la ligne télégraphique qui s'étend de Cincinnati à Pittsburg, avait trouvé par la même méthode 45,600 kilomètres par seconde. Enfin les astronomes des observatoires d'Édimbourg et de Greenwich n'avaient obtenu que 12,200, et ceux des observatoires de Greenwich et de Bruxelles seulement 4,300, c'est-à-dire cent fois moins que M. Wheatstone. Il faut remarquer que dans ce dernier cas, le fil de cuivre destiné à opérer la transmission entre Greenwich et Bruxelles était en grande partie plongé dans la mer.

Voici un tableau qui, en résumant les déterminations, faites suivant différentes méthodes, de la vitesse de propagation de l'électricité, fait ressortir les grandes divergences qui règnent à cet égard entre les résultats obtenus par les divers observateurs.

NOMS des OBSERVATEURS.	NATURE du FIL.	VITESSE en kilomètres PAR SECONDE.
Wheatstone.	Fil de cuivre.	460800
Fizeau et Gonnelle.	Fil de cuivre.	180000
Id.	Fil de fer.	100000
Mitchell.	Fil de fer.	45600
Walker.	Fil de fer.	30000
Gould.	Fil de fer.	25600
Astronomes de Greenwich et d'Édimbourg.	Fil de cuivre.	12200
Astronomes de Greenwich et de Bruxelles.	Fil de cuivre.	4300

C'est à M. Faraday qu'on doit d'avoir trouvé la cause de ces énormes différences et d'avoir montré que les résultats numé-

riques que renferme le tableau ci-dessus ne dépendent pas seulement de la vitesse de propagation de l'électricité, mais tiennent aussi à un phénomène d'une toute autre nature. Déjà dans ses premières recherches sur la propagation de l'électricité dans les corps mauvais conducteurs, Faraday avait remarqué, en parlant des expériences de Wheatstone, que la vitesse de la décharge peut varier beaucoup suivant la tension ou l'intensité de la première force impulsive. Il ajoutait même que le retard de l'étincelle moyenne sur les étincelles extrêmes deviendrait probablement plus sensible si les deux extrémités du fil métallique, qui transmettait la décharge, étaient en communication immédiate avec deux grandes surfaces métalliques isolées, et surtout si ces deux grandes surfaces étaient l'une l'armure intérieure et l'autre l'armure extérieure d'une bouteille de Leyde. Or, le savant physicien anglais a tout dernièrement confirmé l'exactitude de sa conjecture au moyen d'expériences directes faites avec des fils télégraphiques recouverts de gutta-percha, destinés à l'établissement des lignes sous-marines et souterraines. S'étant procuré deux cents bobines de ces fils de huit cents mètres de longueur chacune, il les suspendit à une série de barques rangées dans un canal, de façon que chaque bobine fût entièrement plongée dans l'eau à l'exception d'une petite longueur du fil aux deux extrémités. Il réunit ensuite bout à bout les extrémités des fils de chaque bobine dépouillées de leur enveloppe isolante, de manière à constituer un fil unique de cent soixante mille mètres de longueur, et il fit communiquer une des extrémités de ce long fil avec l'un des pôles d'une pile, en mettant dans le circuit un galvanomètre très-sensible. La pile était composée de trois cent soixante couples zinc et cuivre chargés avec de l'eau acidulée, elle était parfaitement isolée et communiquait avec le sol seulement par son autre pôle. Au moment où l'on supprimait la communication de la pile et du long fil, on éprouvait une commotion très-forte en touchant l'une ou l'autre des extrémités du long fil; cette commotion avait assez de durée pour qu'on pût la décomposer, en ne touchant chaque fois le fil qu'un instant, en une quarantaine de secousses successives. Si, au lieu de toucher une des

extrémités du fil, on la faisait communiquer avec l'un des bouts d'un galvanomètre dont l'autre bout aboutissait au sol, l'aiguille était fortement déviée et l'effet était encore sensible quand on ne faisait l'expérience qu'une demi-heure après que la communication entre le fil et la pile avait été interrompue.

Il est évident que ce résultat est dû à ce que le long fil, l'enveloppe qui l'isole et le liquide conducteur qui l'entoure forment une bouteille de Leyde d'une énorme surface, qui doit, en conséquence, se charger d'une quantité considérable d'électricité, quand son armure intérieure, qui est le fil, communique avec une source électrique, lors même que cette source électrique est de faible tension, comme l'un des pôles de la pile [1]. Dans l'expérience que nous avons citée, le fil de cuivre ayant 1mm, 6 de diamètre, et la couche de gutta-percha, 2mm, 5 d'épaisseur, il en résultait que l'armure intérieure de la bouteille de Leyde, formée par le long fil plongé dans l'eau, avait une surface de 770 mètres carrés d'étendue, et l'armure extérieure de 3,050. Du reste, le phénomène est naturellement d'autant plus prononcé que la pile a plus de tension et qu'elle est par conséquent composée d'un plus grand nombre de couples, la surface de ces couples étant, au contraire, indifférente.

Il est assez curieux de voir le galvanomètre qui est dans le circuit, être fortement dévié au moment où l'on fait communiquer l'une des deux extrémités du long fil avec l'un des pôles de la pile, lors même que le fil est isolé; cet effet est évidemment dû au passage de l'électricité qui charge l'armure intérieure de cette espèce de bouteille. De même au moment où l'on supprime la communication avec la pile, on obtient une forte déviation en sens contraire, pourvu que celui des bouts du galvanomètre qui n'est pas en communication avec l'extrémité du long fil

[1] Volta, immédiatement après la découverte de la pile, avait déjà montré qu'on peut charger une bouteille de Leyde en faisant communiquer son armure intérieure avec l'un des pôles de la pile, l'autre pôle étant mis en communication avec le sol.

aboutisse au sol. Cette seconde déviation manifeste la décharge comme la première indiquait la charge.

Les effets que nous venons de décrire avaient déjà été observés par Siemens au moyen des fils télégraphiques souterrains établis en Prusse. Il avait remarqué l'établissement dans ces fils, pourvu qu'ils fussent bien isolés, des courants instantanés de charge et de décharge que nous venons de signaler, le premier ayant lieu au moment où une des extrémités du long fil était mise en communication avec l'un des pôles d'une pile, et le second, au moment où cette communication cessait et où la pile était remplacée par un conducteur aboutissant au sol. En analysant ce phénomène, M. Siemens en avait bien discerné la véritable cause ; il avait reconnu dans le fil de cuivre l'armure intérieure d'une bouteille de Leyde, dont le sol humide était l'armure extérieure et l'enduit de gutta-percha la couche isolante.

Aux faits que nous venons d'exposer, Faraday en a ajouté un plus curieux encore, qui est cependant toujours la conséquence du même principe. Il s'est servi de quatre fils souterrains de 600 kilomètres de longueur chacun, qui sont établis entre Londres et Manchester ; à la station de Manchester il a réuni les extrémités du premier et du second fil et celles du troisième et du quatrième. A la station de Londres, il a fait communiquer avec l'extrémité du premier fil l'un des bouts d'un galvanomètre, dont l'autre bout était fixé au pôle d'une pile qui avait son autre pôle en communication avec le sol ; il a réuni, par le fil d'un second galvanomètre, l'extrémité du second et du troisième fil, et enfin il a attaché un troisième galvanomètre communiquant aussi avec le sol à l'extrémité du quatrième fil. Au moment où ce circuit a été fermé, l'aiguille du premier galvanomètre a été immédiatement déviée, celle du deuxième ne l'a été qu'au bout d'un intervalle sensible, et celle du troisième un peu plus tard encore, environ deux secondes après celle du premier. On a interrompu la communication du premier galvanomètre avec la pile; aussitôt l'aiguille de ce galvanomètre s'est rapprochée du zéro, celle du second n'a commencé à se déplacer qu'un peu de temps après, et celle du troisième plus tard en-

core. En établissant et supprimant cette communication à intervalles suffisamment rapprochés, on peut, pour ainsi dire, déterminer dans le fil des ondes électriques successives, de telle façon que les trois galvanomètres soient traversés au même instant par trois ondes différentes. Et si, après avoir supprimé la communication du premier galvanomètre avec la pile, on fait communiquer ce galvanomètre avec le sol, l'électricité dont le fil est chargé se décharge simultanément par ses deux extrémités, de façon que le premier et le troisième galvanomètre sont déviés en même temps dans des directions opposées.

Quand au lieu de fils souterrains Faraday employa des fils librement suspendus dans l'atmosphère, les effets furent très-peu marqués; les galvanomètres furent déviés et revinrent au repos presque au même instant tous les trois; c'est qu'ici il n'y avait pas de bouteille de Leyde, puisqu'il n'y avait pas d'armure extérieure et par conséquent d'induction latérale possible. Ainsi cette induction peut, comme nous l'avons vu plus haut, retarder de deux secondes la propagation de l'onde électrique dans des fils souterrains longs de 2,400 kilomètres, propagation qui est instantanée dans un fil de même longueur isolé dans l'air. Cependant, lors même que le fil n'est pas plongé dans l'eau ou placé dans le sol humide, il peut arriver que le voisinage du sol, lorsqu'il en est très-rapproché, ou la présence de conducteurs voisins tels qu'une paroi conductrice, puissent déterminer une induction latérale bien moins forte, il est vrai, mais susceptible pourtant de retarder plus ou moins la propagation de l'électricité. C'est à cette circonstance, qui varie suivant la disposition des fils télégraphiques, qu'on peut attribuer en grande partie les différences considérables que nous avons remarquées dans les résultats obtenus par divers observateurs sur la vitesse de propagation de l'électricité, différences telles, que dans le tableau inséré plus haut, le premier nombre est le centuple du dernier. Il est vrai que l'expérience qui avait donné le dernier était faite avec un fil immergé sous l'eau dans la plus grande partie de sa longueur, tandis que celle qui avait fourni le premier était faite avec des fils tendus

parallèlement et à une assez grande distance les uns des autres et du sol, et réunis alternativement bout à bout, de manière à ne former qu'un seul fil continu replié plusieurs fois sur lui-même. Toutefois, dans ce cas, il y avait encore une induction légère opérée par les parois et le plancher de la chambre où les fils étaient tendus, peut-être même par les fils les uns sur les autres[1], ce qui explique le petit retard éprouvé par l'étincelle du milieu sur les deux étincelles extrêmes.

Il résulte donc du travail de M. Faraday que les expériences par lesquelles on avait cru pouvoir mesurer la vitesse de propagation de l'électricité ne sont nullement concluantes. En effet, elles étaient fondées sur une fausse analogie qu'on avait essayé d'établir entre l'électricité et les agents rayonnants, tels que la lumière et la chaleur. La propagation de l'électricité est d'une toute autre nature; elle résulte évidemment d'une modification imprimée à la matière pondérable interposée entre les deux principes électriques; modification qu'on peut comparer à celle qu'éprouve une série de billes d'ivoire qui transmettent le mouvement que la première reçoit, ou un corps élastique qui propage le son; ce qui fait que la vitesse de la propagation doit varier avec les corps qui l'exercent et avec les circonstances dans lesquelles ils sont placés, comme l'ont observé MM. Fizeau et Gonnelle, dont les résultats nous paraissent le mieux représenter la vitesse réelle de propagation de l'électricité. Elle nous paraît en outre devoir varier, du moins dans l'évaluation qu'on en fait, avec la nature des effets par lesquels l'électricité accuse sa présence. Il va sans dire que nous ne parlons ici que de la propagation rapide de l'électricité; car la propagation lente est un phénomène d'un tout autre genre, et ce n'est pas d'elle qu'il s'agit[2].

[1] Ces fils étaient en effet à une distance de 16 centimètres les uns des autres, et pouvaient par conséquent s'influencer mutuellement.

[2] Les expériences de M. Latimer Clark, que nous avons citées plus haut (p. 132), en montrant que la vitesse de propagation du courant est la même, quelle que soit la tension de la pile, fournissent une preuve bien forte en faveur de l'analogie que nous admettons entre le mode de propagation de l'électricité et celui des sons, qui se propagent avec la même vitesse dans le même milieu, lors même qu'ils sont plus ou moins aigus et plus ou moins intenses. C'est ce qu'avait remarqué

Une autre conséquence qu'on peut tirer des expériences de Faraday, c'est la liaison intime qui existe entre les deux formes de l'électricité, que nous avons désignées sous les noms de statique et de dynamique. Nous savions déjà, grâce aux recherches de M. Colladon, que l'on peut produire un courant capable d'agir sur le galvanomètre en soutirant par une pointe l'électricité statique accumulée sur un conducteur isolé. Nous voyons ici l'inverse, c'est-à-dire que Faraday a réussi, en lançant le courant d'une pile dans un long conducteur isolé, à le charger d'électricité statique. Déjà il avait obtenu un effet analogue au moyen des courants d'induction, mais le changement de l'électricité dynamique en statique est plus direct et plus concluant dans les expériences que nous venons de rappeler.

En terminant ce paragraphe et ce chapitre, nous ne pouvons nous empêcher de faire remarquer d'avance, pour justifier l'étendue que nous lui avons donnée, combien l'étude générale, et détaillée en même temps, que nous venons de faire de la propagation de l'électricité, facilitera celle que nous allons aborder des phénomènes auxquels cette propagation donne naissance.

M. Melloni, sur la demande duquel M. Latimer Clark avait entrepris les expériences importantes dont nous avons fait connaître les résultats. Le savant physicien italien avait également observé que le retard que la vitesse du courant éprouve dans les fils souterrains par l'effet de l'induction latérale, doit être le même, et que par conséquent la vitesse absolue doit être également la même, quelle que soit la tension de la pile ; et cela, parce que la portion de l'électricité qui est déviée du côté de la paroi du fil par l'effet de l'induction (ce qui produit le retard), y étant retenue par une force qui provient de cette électricité même, elle doit nécessairement varier proportionnellement à son intensité, et produire par conséquent un retard qui est toujours le même.

Liste des principaux travaux relatifs aux sujets traités dans ce chapitre :

De la Rive. — Distribution et lois de la propagation de l'électricité dynamique. — *Mémoire de la Soc. de phys. et d'hist. nat. de Genève.* T. III, p. 109. — *Annales de ch. et de phys.* T. XXVIII, p. 190. — Influence de la chaleur sur la conductibilité électrique. — *Bibl. univ.* T. VII, p. 388.

Kirchoff. — Lois de la distribution dans une plaque métallique. — *Annales de ch. et de phys.* (*nouvelle série*). T. XL, p. 115 et 327, T. XLI, p. 496.

Fechner. — Lois expérimentales de l'intensité des courants dans un circuit fermé. — 1 vol. in-4°. Leipsick, 1831.

Pouillet. — *Idem.* — *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris.* T. VI (1837), p. 267. — *Traité de Physique.*

Wheatstone. — Rhéostat et instruments électriques — *Annales de ch. et de phys.* (*nouvelle série*). T. X, p. 257. — Vitesse de l'électricité. — *Trans. phil. de la Société royale de Londres* (1836), 2e partie, p. 583, et *Arch. de l'électricité.* T. II, p. 35.

Jacobi. — Étalon de résistance. — *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris.* T. XXXIII (1851), p. 280.

Matteucci. — Propagation de l'électricité dynamique dans les liquides. — *Annales de ch. et de phys.* T. LXIII, p. 256, et t. LXVI, p. 225. — Conductibilité. — *Annales de ch. et de phys.* (*nouvelle série*). T. XV, p. 498. — Propagation dans les mauvais conducteurs. *Annales de ch. et de phys.* (*nouvelle série*). T. XXVII, p. 133, et t. XXVIII, p. 385.

Marianini. — Propagation dans les liquides. — *Annales de ch. et de phys.* T. XXXIII, p. 141, et t. XLII, p. 131.

Ohm. — Lois de la propagation des courants. — *Archives d'électricité.* T. I, p. 30.

Kohlrausch. — Mode de propagation du courant. — *Arch. des sciences phys.*, T. XXII, p. 105.

E. Becquerel. — Conductibilité des solides et des liquides. — *Annales de ch. et de phys.* (*nouvelle série*). T. XVII, p. 262, et t. XX, p. 53. — Conductibilité des gaz. *Idem.* T. XXXIX, p. 355.

Lenz. — Conductibilité de quelques corps. — *Bibl. univ.* (1838). T. XVII, p. 38. — *Idem.* Conductibilité à des températures différentes. — *Annales de ch. et de phys.* T. XXXIX, p. 355.

Wartmann. — Conductibilité des substances minérales. — *Mémoire de la Soc. de phys. et d'hist. nat. de Genève.* T. XXIII (Ire partie). — *Arch. des sc. phys.* T. XXII, p. 84.

Hankel. — Influence de la chaleur sur la conductibilité des liquides. — *Arch. des sc. phys.* T. VI, p. 66.

Riess. — Conductibilité électrique de quelques corps solides et des corps non conducteurs. — *Arch. de l'électricité.* T. LI, p. 91 et 177. — Portée explosive. — *Idem.* T. I, p. 206 et 425. — Images électriques. *Arch. des sc. phys.* T. I, p. 425.

Vorsellmann de Heer. — Influence de la chaleur sur les électrodes. — *Arch. de l'électricité.* T. I, p. 589.

Bectz. — Même sujet. — *Arch. des sc. phys.* T. XIII, p. 282.

Karsten. — Conductibilité des sulfures. — *Arch. des sc. phys.* T. V, p. 350. — Figures électriques. — *Arch. de l'électricité.* T. III, p. 310, et t. IV, p. 457.

Rousseau. — Appareils pour la conductibilité imparfaite. *Annales de ch. et de phys.* T. XXV, p. 393.

Wiedemann. — Conductibilité des cristaux. — *Arch. des sc. phys.* T. XXII, p. 44.

De Sénarmont. — Même sujet. — *Annales de ch. et de phys.* (*Nouvelle série.*) T. XXVIII, p. 257.

Knoblauch. — Direction des cristaux entre deux pôles électriques. — *Annales des sc. phys.* T. XIX, p. 214[1].

Ermann. — Conducteurs unipolaires. — *Ann. de chim.* T. LXI, p. 113, et *Annales de ch. et de phys.* T. XXV, p. 298.

Peltier. — Vaporisation favorisée par l'électricité. — *Annales de ch. et de phys.* T. LXXV, p. 330. — Modifications moléculaires des conducteurs. — *Comptes rendus de l'Acad. des sciences.* T. XX (1845), p. 62, et *Arch. des sc. phys.* T. V, p. 182.

Andrews. — Conductibilité des flammes. — *Bibl. univ.* T. VI (1836), p. 158.

Belli. — Différence entre la vitesse de dispersion des deux électricités. — *Bibl. univ.* T. XXIII (1838), p. 196.

Morgan. — Conductibilité du vide et propagation dans les conducteurs imparfaits. — *Bibl. Brit.* T. II, p. 119, et t. XII, p. 3.

Harris. — Influence électrique de l'air raréfié. — *Bibl. univ.* T. XVII (1838), p. 195, et *Transact. philos.* (1834), 2e partie, p. 203.

Davy. — Conductibilité du vide. — *Annales de ch. et de phys.* T. XX, p. 168.

Fusinieri. — Transport des substances solides par les décharges. — *Archives de l'électricité.* T. III, p. 597, et t. V, p. 516.

Moser. — Images. — *Comptes rendus de l'Acad. des sciences.* T. XV (1842), p. 119, 448, 855 et 1201.

Knorr. — Images électriques. — *Arch. d'électr.* T. V, p. 115.

Hunt. — Même sujet. — *Idem.* T. V, p. 5.

Morren. — Même sujet. — *Comptes rendus de l'Acad. des sciences.* T. XVI, p. 1078 et 1303; et t. XVII, p. 87.

Masson. — Même sujet. — *Idem.* T. XVI, p. 762 et 1652; et *Arch. d'électr.* T. III, p. 445.

Walker et Gould. — Vitesse de l'électricité. — *Ann. des sc. phys.* T. XIX, p. 303.

Fizeau et Gonnelle. — Même sujet. — *Comptes rendus de l'Acad. des sciences.* T. XXX, p. 137, et *Arch. des sc. phys.* T. XIV, p. 212.

Faraday. — Conductibilité électrique, décharges, etc. — *Collection de Mémoires extraits des Trans. phil. de* 1832 à 1838, 1 vol. in-8. — Induction exercée par la propagation dans les longs fils. — *Arch. des sc. phys.* T. XXV, p. 209.

Becquerel père. — Conductibilité. — *Ann. de ch. et de phys.* T. XXXII, p. 420. — *Traité d'électricité.*

[1] Dans le nombre des recherches qui démontrent l'influence de la structure moléculaire des corps sur leurs propriétés électriques, nous avons omis de parler de celle de M. Knoblauch. Ce physicien a remarqué que les cristaux suspendus entre les pôles opposés de deux piles sèches très-fortes, affectent une direction toujours la même, qui est liée avec la disposition de leurs plans de clivage. Il a réussi à obtenir les mêmes effets en construisant artificiellement des corps où le mode d'agrégation n'était pas le même dans toutes les directions, comme M. Tyndall et lui l'avaient déjà fait pour imiter les propriétés magnétiques et diamagnétiques des cristaux. (Tome I, p. 523.)

CHAPITRE II.

EFFETS CALORIFIQUES ET LUMINEUX DE L'ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE.

§ 1. Formes et conditions sous lesquelles la chaleur et la lumière sont produites par l'électricité dynamique.

Nous avons déjà fait mention de la propriété que possède l'électricité en mouvement de donner naissance, dans sa transmission, à de la chaleur et à de la lumière. Nous avons même décrit des voltamètres calorifiques fondés sur la chaleur que développe le courant électrique en traversant un fil fin de métal[1]. Nous avons également exposé quelques-uns des phénomènes de chaleur et de lumière que produisent les décharges électriques, sous formes d'étincelles ou d'incandescence et de fusion des métaux[2]. Nous sommes appelé maintenant à étudier de plus près cet ordre de faits, à en examiner les détails et à en rechercher les lois.

La chaleur et la lumière qui accompagnent la réunion des deux électricités ou cet état que nous avons désigné sous le nom d'électricité dynamique, se présentent sous des formes très-variées. La plus simple et la plus directe est l'élévation de température qui résulte, dans un conducteur, du passage de l'électricité dynamique, soit continue, telle qu'un courant, soit instantanée, telle qu'une décharge. Cette élévation de température est d'autant plus considérable pour un même conducteur que ce conducteur a des dimensions moindres, et par conséquent qu'il présente plus de résistance à la transmission de l'électricité et un volume moins grand à l'action de la chaleur

[1] Tome I, pages 30 et suivantes.
[2] Tome I, pages 116 et suivantes.

dégagée. Elle varie également avec la nature des conducteurs; mais elle a lieu dans tous, aussi bien dans les liquides que dans les solides, seulement à des degrés différents suivant leur nature et leurs dimensions.

Une seconde forme sous laquelle se manifestent encore la chaleur et la lumière électriques est celle qu'on désigne sous le nom d'*étincelle électrique* et d'*arc voltaïque*. Elle diffère de la première d'abord en ce qu'elle donne toujours nécessairement naissance à la fois à de la lumière et à de la chaleur, tandis que la première produit de la chaleur obscure et ne dégage de la lumière que lorsque la chaleur devient assez intense pour rendre le conducteur incandescent. La seconde forme diffère encore de la première en ce que les phénomènes lumineux et calorifiques s'y manifestent par le passage de l'électricité dynamique, non à travers un conducteur continu, mais entre deux conducteurs chargés d'électricités contraires, placés à une distance plus ou moins grande l'un de l'autre et séparés par un milieu isolant ou mauvais conducteur, tels que le vide, un fluide élastique ou un liquide. L'étincelle diffère de l'arc voltaïque, avec lequel elle a du reste beaucoup de rapport, en ce qu'elle est le résultat de la réunion instantanée des deux électricités, tandis que l'arc est produit par leur réunion continue, de sorte qu'on peut regarder l'arc comme composé d'une série d'étincelles qui se succèdent très-rapidement. L'étincelle est en général produite par les décharges des machines électriques et des bouteilles de Leyde dans le phénomène que nous avons appelé explosion, tandis que l'arc se manifeste entre deux conducteurs communiquant chacun avec l'un des pôles d'une pile voltaïque. Toutefois, l'identité réelle qui existe, malgré la différence d'apparence, entre l'étincelle et l'arc, peut facilement être constatée en faisant usage, pour les produire, des courants d'induction qui sont également propres à les manifester tous les deux. Un caractère commun également à l'étincelle et à l'arc, c'est le transport de matière pondérable qui accompagne toujours leur manifestation.

Quelle que soit celle des deux formes sous lesquelles se manifeste le dégagement de lumière et de chaleur produit par l'élec-

tricité, il existe, pour l'une comme pour l'autre, une condition nécessaire à leur manifestation : c'est que l'électricité dynamique rencontre dans sa transmission une résistance, et c'est dans les points d'un même circuit où cette résistance est le plus grande, que la chaleur et la lumière sont le plus intenses. Cette première condition en entraîne une seconde, c'est que l'appareil électrique puisse dégager des électricités douées d'une tension suffisante pour vaincre la résistance du milieu à travers lequel leur réunion doit s'opérer.

Dans l'examen que nous allons faire des phénomènes que nous venons simplement d'indiquer, nous commencerons par ceux qui se manifestent sous la première forme, c'est-à-dire dans le cas où la propagation de l'électricité a lieu à travers un conducteur continu; nous passerons ensuite à ceux qui ont lieu quand le conducteur est interrompu (étincelle électrique et arc voltaïque); puis nous terminerons ce chapitre par une étude plus spéciale de la lumière électrique et de ses propriétés.

§ 2. Effets calorifiques produits par le passage de l'électricité dynamique à travers de bons conducteurs.

Ce ne fut guère qu'après que la science eut été mise en possession de la bouteille de Leyde, que l'on put étudier les effets de chaleur produits par les décharges électriques à travers les bons conducteurs. Franklin réussit à fondre, par ces décharges, des feuilles minces de métal; Beccaria et surtout Priestley parvinrent à rendre incandescents et même à fondre des fils métalliques de la même manière. Priestley avait même fait une observation très-importante dont toutes les expériences subséquentes ont confirmé l'exactitude, savoir : que si l'on fait passer la décharge d'une forte batterie électrique à travers deux fils métalliques successifs liés bout à bout l'un à l'autre, de même longueur, de même diamètre, mais de nature différente, il n'y en a qu'un qui soit fondu et dispersé, et c'est toujours le moins conducteur des deux. Ainsi, de deux fils, l'un de fer, l'autre de

cuivre, c'est le fer qui est dispersé totalement par l'explosion, tandis que le cuivre reste intact; de deux fils, l'un de cuivre, l'autre d'argent, c'est le cuivre qui est dispersé, et c'est l'argent quand le second fil est d'or au lieu d'être de cuivre.

Cuthberson, en opérant dans l'air, sur des fils de différents métaux de $0^m,27$ de longueur, et avec une batterie dont les armures intérieures avaient à peu près $1^m,79$ carrés de surface, avait obtenu les résultats suivants :

DÉSIGNATION DES MÉTAUX.	DIAMÈTRE DES FILS [1].	CHARGE en grains DE L'ÉLECTROMÈTRE.	COULEUR de la poussière métallique recueillie.
Fil de plomb.	$\frac{1}{90}$	20	Gris peu foncé.
Fil d'étain.	$\frac{1}{90}$	30	Presque blanc.
Fil de zinc.	$\frac{1}{90}$	45	Id.
Fil de fer.	$\frac{1}{150}$	35	Brun rougeâtre.
Fil de cuivre.	$\frac{1}{150}$	35	Brun tirant sur le pourpre.
Fil de platine.	$\frac{1}{150}$	35	Noir.
Fil d'argent.	$\frac{1}{150}$	48	Id.
Fil d'or.	$\frac{1}{150}$	40	Pourpre brunâtre.

[1] Les diamètres sont évalués en fractions de pouces anglais.

En mesurant, d'une part, la charge de la batterie au moyen d'un électromètre [2], et, d'autre part, l'action calorifique produite par la décharge en prenant pour unité de mesure la longueur d'un fil de fer fondu d'un diamètre donné, Cuthberson avait trouvé que l'action calorifique était à peu près proportionnelle au carré de la charge de la batterie pour certaines longueurs des fils. Cette loi, entrevue seulement par Cuthberson, qui n'avait que des moyens d'observation très-imparfaits, a été rigoureusement établie par Riess, comme nous le verrons dans

[2] L'électromètre à poids employé par Cuthberson est semblable à l'électromètre déchargeur du même physicien (tome I, page 115), dans lequel un petit poids curseur peut être placé à différentes distances de l'axe de l'appareil, le long de l'une des tiges, qui est divisée de manière à ne déterminer la décharge que quand on a atteint une certaine intensité de l'électricité.

l'instant, non pas pour la fusion, mais pour l'échauffement même des fils.

Avec la grande machine du musée de Teyler, à Harlem, Van Marum était parvenu à fondre un fil de fer de 16 mètres de longueur; et, en opérant avec des fils de nature différente, mais de même diamètre, il avait trouvé que la longueur qu'il pouvait en fondre avec la même charge était la plus grande pour le plomb, puis pour l'étain, pour le fer, pour l'or, etc. Quand les expériences ont lieu dans l'air, les fils sont, non-seulement chauffés et fondus, mais sont de plus brûlés s'ils sont d'un métal oxydable. Priestley en avait déjà fait la remarque quoiqu'il n'eût pas alors de notions justes sur la combustion; il avait observé en particulier que, lorsque le fil de fer est fondu par l'explosion électrique, des étincelles brillantes se dispersent autour de la chambre en toutes sortes de directions, ce qui est un signe de combustion. Avec des fils d'acier on voit, lorsque la charge de la batterie n'est pas suffisante pour les fondre, leur surface revêtir des couleurs diverses, correspondantes aux degrés d'oxydation qu'ils ont éprouvés. Le platine et l'or ne s'oxydent pas, mais ils sont simplement fondus et volatilisés. Dans l'azote ou l'hydrogène les autres métaux se réduisent simplement, par l'effet d'une décharge qui les disperse, en une poussière fine non oxydée.

Toutes les expériences que nous venons de citer se font au moyen des *déchargeurs* décrits tome I, page 115, et dans des ballons munis de tiges de cuivre qui servent à transmettre la décharge aux fils, quand il s'agit d'opérer dans d'autres milieux que dans l'air ordinaire.

Bien vite après la découverte de la pile voltaïque, on observa que le passage du courant électrique à travers des fils métalliques pouvait, aussi bien que la transmission des décharges, les chauffer, les rendre incandescents et les fondre, et qu'on obtenait de la même manière, avec des feuilles métalliques très-minces, telles que des feuilles d'or battu, des phénomènes de déflagration très-intenses. Cuthberson signala quelques différences importantes entre l'effet du courant et celui des décharges. Ainsi, outre la durée de l'ignition, qui a lieu dans le

premier cas et non dans le second, il y a encore une différence entre les deux modes, savoir, qu'il se produit, avec les décharges, une explosion qui disperse et réduit en poudre les fils métalliques, tandis que rien de semblable ne se passe avec le courant.

Fourcroy, Vauquelin et Thénard remarquèrent, les premiers, que les piles voltaïques à grandes surfaces, tout en n'ayant pas plus de tension pour un même nombre de couples que celles à petites surfaces, développaient beaucoup plus de chaleur que les dernières dans les fils métalliques placés entre leurs pôles. Davy trouva, de son côté, qu'avec une pile à larges plaques, on pouvait mettre immédiatement de l'eau en ébullition en y plongeant un fil de fer long de 65 centimètres, et d'un diamètre de $\frac{1}{3}$ de millimètre, placé entre les pôles de cette pile. Ce fil lui-même pouvait devenir rouge-blanc sur une longueur de 8 à 10 centimètres. Il avait déjà auparavant réussi le premier à faire rougir et à brûler des fils d'acier, des lames minces d'étain, de zinc, de cuivre, d'argent et d'or. Chacun de ces métaux en brûlant donne une flamme d'une couleur différente, accompagnée d'une espèce de crépitation et d'une sorte de sifflement remarquable. Le zinc donne une flamme bleue; l'étain, pourpre; le plomb, jaune avec un bord violet; le cuivre, verte accompagnée de vives étincelles; l'argent, blanche au centre, et verte sur les bords; l'or, jaune brillante. Tous ces métaux s'oxydent dans cette déflagration; l'or en particulier passe à l'état d'oxyde brun. Le platine seul, réduit en feuilles aussi minces que possible, rougit à blanc, se fond, scintille sur les bords, mais ne passe pas à l'état d'oxyde.

Pour faire ces expériences commodément, il faut avoir une petite échelle composée de deux tiges métalliques verticales fixées sur un pied en bois et réunies par de gros fils de laiton, situés parallèlement les uns au-dessus des autres, à 10 ou 12 centimètres de distance (fig. 193). On suspend des feuilles métalliques à ces espèces d'échelons, de façon que les feuilles

Fig. 193.

de même nature soient suspendues au même fil, puis après avoir mis en communication l'échelle métallique avec l'un des pôles de la pile, on fait aboutir l'autre à une boule de laiton ou mieux encore de platine, fixée à l'extrémité d'un manche de verre ou de bois. On touche successivement avec la boule chacune des feuilles minces et on détermine sa déflagration et sa combustion en la mettant ainsi dans le circuit voltaïque. On peut de cette manière étudier très-bien le phénomène sur chaque feuille métallique séparément.

Plus tard, Children observa, sur une grande échelle et d'une manière détaillée, les effets calorifiques de l'électricité dynamique dans les bons conducteurs. Ce physicien se servit d'une pile de 25 couples cuivre et zinc, dont chaque plaque avait 3 mètres $\frac{1}{2}$ carrés de surface, chargés avec de l'eau acidulée. Il commença par interposer entre les pôles de cette pile des fils métalliques associés deux à deux, de manière à former un seul conducteur composé de deux bouts de fil de nature différente, mais de même longueur et de même diamètre; le moins conducteur s'échauffait, rougissait même, tandis que l'autre restait froid; ainsi en formant une chaîne métallique de trois fils de platine et de trois fils d'argent qui alternent, on voit tous les fils de platine devenir incandescents, tandis que ceux d'argent ne le deviennent pas. Ce résultat est semblable à celui que Priestley avait obtenu, en se servant de décharges au lieu de courants. Une autre expérience de Children, qui lui fut suggérée par Wollaston, consiste à mettre parallèlement l'un à l'autre dans le circuit, deux fils de platine de même longueur; mais l'un de 1 millimètre de diamètre et l'autre de $\frac{1}{2}$ millimètre seulement; on voit le plus épais des deux fils rougir, tandis que lorsque les deux fils sont réunis à la suite l'un de l'autre, c'est l'inverse, c'est-à-dire le plus fin qui rougit. Dans le second cas, comme ils font partie du même circuit, il n'est pas étonnant que le plus fin qui présente le plus de résistance au courant s'échauffe davantage; quant au premier cas, le plus gros transmettant une proportion plus forte d'électricité et ayant une surface de refroidissement, proportionnellement à son volume, moins grande que le plus fin, il est celui qui doit acquérir la température la

plus élevée. Children, au moyen de son puissant appareil, avait réussi à mettre en incandescence et même en fusion des fils de platine très-gros et passablement longs; l'un d'eux avait 5 millimètres de diamètre et 7 centimètres de longueur; mais tous ces effets ont été obtenus dès lors sur une bien plus grande échelle au moyen des piles de Grove et de Bunzen.

L'appareil le plus convenable pour produire les différents phénomènes d'incandescence des fils que nous venons de décrire, consiste (fig. 194) dans deux colonnes en laiton, fixées sur une petite table et mises chacune par une pince en communication avec les pôles de la pile, l'une avec le positif, l'autre avec le négatif. L'une des colonnes porte des pinces auxquelles on fixe, par une de leurs extrémités les divers fils qu'on veut mettre dans le circuit, l'autre extrémité de chacun de ces fils est enroulée autour d'une cheville en métal, qui elle-même est fixée dans un trou percé dans la seconde colonne à la même hauteur que la pince correspondante de la première colonne; de manière que le fil, lorsqu'il est tendu, soit bien horizontal. Maintenant pour éviter que les fils soient tous en même temps dans le circuit, au-dessous de chacun des trous de la seconde colonne, il s'en trouve un second semblable, mais revêtu intérieurement d'une couche isolante, de cire, de verre ou d'ivoire. C'est dans ces trous qu'on insère les chevilles auxquelles aboutissent les fils qu'on ne veut pas mettre dans le circuit, laissant celui ou ceux qu'on veut échauffer par le passage du courant, dans les trous métalliques. De cette manière on peut voir successivement l'effet de la transmission du même courant sur tous les différents fils, les uns homogènes, les autres composés de bouts alternativement d'une espèce et alternativement d'une autre, les uns plus gros, les autres plus fins,

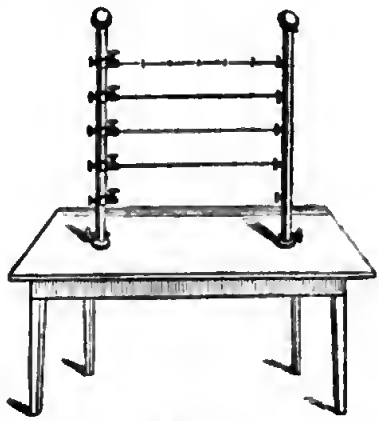


Fig. 194.

ou étudier ce même effet simultanément sur deux fils placés parallèlement dans le circuit; par exemple, un fil fin et un fil gros de platine, deux fils de même diamètre et de même longueur, l'un de platine, l'autre d'argent.

Pendant que Children observait sur une si grande échelle les phénomènes d'ignition voltaïque, Wollaston réussissait à rougir un fil de platine très-fin de $\frac{1}{100}$ de millimètre de diamètre[1] au moyen d'un seul petit couple zinc et cuivre de 7 centimètres carrés de surface.

Les métaux et les corps solides conducteurs ne sont pas les seuls qui s'échauffent par l'effet du passage du courant électrique. Les liquides éprouvent également une élévation de température considérable; c'est ce que Davy avait déjà constaté dans ses expériences sur la décomposition de l'eau et des dissolutions salines, par l'électricité dynamique. Ayant mis dans le circuit d'une batterie de cent paires à petites surfaces deux cônes d'or, remplis d'eau distillée et communiquant par une mèche d'asbeste, il plaça un thermomètre dans chacun des cônes, puis ajouta à l'eau du cône positif une goutte de solution de sulfate de potasse; la décomposition commença et fut suivie d'une élévation de température qui devint suffisante pour faire entrer l'eau en ébullition en moins de deux minutes. Avec une solution de nitrate d'ammoniaque, la chaleur dégagée s'éleva tellement qu'elle évapora entièrement l'eau en trois ou quatre minutes. Oersted observa plus tard que dans une colonne d'eau, traversée par le courant, l'élévation de température est plus considérable au pôle positif (20°,5) qu'au négatif (18°), mais que c'est au milieu qu'elle est le plus forte (23°). J'étais arrivé au même résultat qu'Oersted, mais en même temps j'avais observé que l'on peut considérablement augmenter le développement

[1] On sait que Wollaston se procurait ces fils si fins en logeant dans l'axe d'un cylindre d'argent un fil fin de platine, et en tirant à la filière le cylindre en un fil aussi fin que possible. On en prend ensuite un bout qu'on recourbe en forme d'U; puis on plonge le fil, sauf ses deux extrémités, pendant quelques minutes, dans l'acide nitrique; l'argent se dissout, et il ne reste que le platine d'une finesse extrême. Les bouts de ce fil, qui ont conservé leur enveloppe d'argent, servent à le rendre ostensible et tangible.

de la chaleur dans l'intérieur d'une masse liquide placée entre les deux pôles d'une pile, en la divisant en plusieurs compartiments par des diaphragmes poreux faits de vessie ou de baudruche. On trouve que la température est plus élevée dans les compartiments du milieu que dans ceux des extrémités et que dans chaque compartiment elle l'est de 2° de plus environ dans la portion du liquide en contact avec le diaphragme de vessie que dans le reste. Si l'on fait passer le même courant successivement au travers d'un liquide contenu dans un tube de verre d'un certain diamètre et d'une certaine longueur et au travers d'une mèche de coton de même longueur et de même diamètre que le tube, on voit la température du liquide contenu dans le tube rester stationnaire, tandis que celle de la mèche de coton s'élève considérablement, ce qui provient de ce que les cellules du coton dans lesquelles le liquide est logé forment autant de petites loges séparées les unes des autres par des diaphragmes que l'électricité est obligée de traverser. Par la même raison, une tige de plante grasse qui est un conducteur liquide séparé en une multitude de petites cellules par des diaphragmes non métalliques, se réchauffe jusqu'au point que l'eau qu'elle renferme entre en ébullition, quand on la met, au moyen de deux pointes de platine, dans le circuit d'une pile un peu forte. C'est toujours au moyen de fils ou de petites lames de platine que les liquides sont mis dans le circuit voltaïque, afin de ne pas compliquer les résultats par l'action chimique exercée sur les surfaces des électrodes par les dissolutions dans lesquelles ils sont immergés.

Les liquides différents placés sur la route du même courant présentent le même phénomène que les conducteurs métalliques, savoir : que ce sont les moins conducteurs qui s'échauffent le plus. En disposant dans le même circuit voltaïque les unes à la suite des autres, plusieurs capsules semblables remplies chacune d'une quantité égale d'eau ou de solutions salines et acides différentes, réunies deux à deux par des arcs de platine, on voit celle où est l'eau pure s'échauffer de 10 à 12° au-dessus de la température ambiante, tandis que les autres se réchauffent à peine. Si on enlève la capsule pleine d'eau, c'est toujours,

parmi les restantes, celle qui contient le liquide le moins conducteur qui s'échauffe le plus.

Toutes ces expériences semblent démontrer d'une manière péremptoire que dans les liquides, comme dans les solides, le développement de la chaleur produit par le passage du courant électrique provient de la résistance que ce courant rencontre, puisque là où elle est le plus grande, là aussi l'élévation de température est le plus considérable. Cette loi générale trouve encore sa confirmation dans plusieurs faits d'une autre nature que j'ai eu l'occasion d'observer, et dont je me bornerai à rapporter les plus importants.

La chaleur développée dans des quantités égales de liquides conducteurs semblables, traversés successivement par le même courant, est d'autant plus considérable que les électrodes présentent, soit par leur dimension, soit par leur nature, plus de résistance au courant, leurs distances restant les mêmes. En employant au lieu de courants continus, des courants rendus discontinus, au moyen d'un rhéotome ou d'un commutateur placé dans le circuit [1], on obtient une température moins élevée dans celui des liquides où les courants discontinus sont dirigés alternativement en sens contraire, que dans celui où ils sont dirigés constamment dans le même sens; or comme nous le verrons dans le chapitre des décompositions électro-chimiques, la transmission de l'électricité éprouve beaucoup moins de résistance dans le premier cas que dans le second. Pour faire cette expérience, on place à la suite l'un de l'autre deux systèmes parfaitement semblables de conducteurs liquides, qui sont unis et mis dans le circuit par de petites lames de platine, puis dans le même circuit on met encore un fil fin de platine plongé dans une quantité donnée d'eau, où se trouve la boule d'un thermomètre sensible. On fait passer dans cette succession de conducteurs, pendant le même temps, la même quantité d'électricité [2], et on trouve que la somme des quantités de chaleur

[1] Voyez, pour la description de ces appareils, tome I, page 298 et fig. 130, et pages 401, 402, fig. 154.

[2] On s'assure que la même quantité d'électricité a passé dans chaque cas en

développées dans les deux systèmes liquides et dans le fil de platine est sensiblement la même; que le courant soit continu, qu'il soit discontinu et dirigé constamment dans le même sens dans les deux systèmes, ou enfin qu'il soit discontinu et dirigé dans l'un des systèmes toujours dans le même sens et dans l'autre alternativement en sens contraires. Seulement, dans ce cas, le premier système s'échauffe plus que le second, ainsi que nous l'avons dit, et il y a aussi plus de chaleur développée dans le fil de platine.

Il est assez curieux de voir le système liquide dans lequel, les courants cheminant toujours dans le même sens, il y a un dégagement gazeux, se réchauffer davantage que celui où à cause du sens alternativement contraire des courants il n'y en a pas [1]. Ce résultat semblerait indiquer que la formation des gaz ne diminue pas dans un liquide la quantité de chaleur dégagée par le courant, laquelle ne dépendrait que de la résistance que l'électricité rencontre. Cependant nous avons vu que dans de l'eau décomposée par voie électro-chimique, l'élévation de la température est moindre aux deux pôles où se dégagent les deux gaz oxygène et hydrogène qu'entre deux, et que c'est au pôle négatif où le dégagement du gaz (hydrogène) est le plus considérable qu'elle est le plus faible. Ces différences sembleraient bien démontrer que la formation des gaz n'est pas sans quelque influence, d'autant mieux que, lorsque la colonne d'eau est traversée par des courants discontinus dirigés alternativement en sens contraires, cas où cette formation n'a pas lieu, toutes ces différences disparaissent et la distribution de la température dans le liquide devient parfaitement uniforme. Nous reviendrons sur ce point important quand

plaçant dans le circuit, mais de manière que les courants discontinus le traversent toujours dans le même sens, un voltamètre chimique (tome I, page 33), et en arrêtant l'expérience quand le même volume de gaz a été dégagé.

[1] L'absence de production de gaz n'est qu'apparente. Elle tient à ce que l'oxygène et l'hydrogène, qui proviennent de la décomposition de l'eau, se succédant très-rapidement sur la surface des mêmes électrodes, à cause du sens alternativement contraire des courants, il y a recomposition de l'eau en même temps que décomposition.

nous aurons étudié les effets chimiques de l'électricité dynamique.

Après cette revue rapide des principaux résultats obtenus par les physiciens qui se sont occupés des effets calorifiques que détermine l'électricité dynamique par son passage à travers les bons conducteurs, il nous reste à exposer les lois plus précises que des recherches rigoureuses ont permis d'établir.

§ 3. Lois qui régissent les effets calorifiques des décharges dans les bons conducteurs.

Pour étudier de plus près les effets calorifiques des décharges, Harris et Riess ont fait l'un et l'autre usage d'un thermomètre à air dont la boule est traversée par un fil de métal qui, en transmettant la décharge, se réchauffe d'une quantité que mesure le mouvement de l'index thermométrique. Cet appareil, que nous avons décrit dans la première partie de cet ouvrage [1], exige pour pouvoir fournir des résultats exacts et comparables, beaucoup de soin dans sa construction, et c'est probablement à l'imperfection de celui dont Harris faisait usage, qu'il faut attribuer l'inexactitude de quelques-unes des conséquences qu'il a tirées de ses expériences. Harris, en effet, avait cru pouvoir établir que l'effet calorifique d'une décharge électrique opérée à travers des fils métalliques ne dépend que de la quantité d'électricité, et par conséquent est le même, quelle que soit la tension de l'électricité dans la batterie, pourvu que la quantité totale reste la même; loi qui n'est pas exacte, ainsi que Riess l'a démontré. D'un autre côté, Harris était parvenu à mesurer assez exactement le rapport qui existe entre la quantité de chaleur dégagée par un fil et sa résistance électrique, par l'effet de la transmission d'une même quantité d'électricité. Voici le tableau qu'il avait donné de ces rapports :

[1] Tome I, page 31, figure 20.

Métaux.	Échauffement.	Résistance.
Argent.	6	1
Cuivre.	6	1
Or.	9	1 ½
Zinc.	18	3
Platine.	30	5
Fer.	30	5
Étain.	36	6
Plomb.	72	12

Il résulte, comme on le voit, de ce tableau que le réchauffement est exactement proportionnel à la résistance ou, ce qui revient au même, inverse de la conductibilité électrique.

Riess, par un soin tout particulier apporté à la construction de son thermomètre électrique et par le nombre considérable comme par l'exactitude scrupuleuse de ses expériences, est parvenu à établir avec une précision remarquable les lois des phénomènes qui nous occupent. En énonçant ces lois, nous allons chercher à exposer les procédés qu'a suivis l'habile physicien pour y parvenir, tout en regrettant que les limites qui nous sont imposées ne nous permettent pas d'entrer dans autant de détails que nous l'aurions voulu.

Le thermomètre électrique se compose d'un tube de verre de 45 centimètres de longueur recourbé à angle droit à ses deux extrémités, dont l'une est terminée par un ballon de verre de 9 ½ centimètres de diamètre et l'autre par un vase cylindrique de 7 centimètres sur 1 ½ centimètre de diamètre (fig. 195). Le tube muni d'une échelle divisée arbitrairement est fixé sur une planchette de bois attachée par des charnières à un plateau horizontal, de manière à pouvoir être incliné à volonté sur l'horizon et à être assujetti dans la position qu'on lui donne à l'aide d'un arc de métal divisé et d'une vis de pression. On verse dans le vase cylindrique de l'acide sulfurique coloré étendu avec de l'alcool. Le ballon du thermomètre est perforé en trois places dont deux sont diamétralement opposées. Des douilles de métal mastiquées sur ces deux ouvertures se ferment hermétiquement par des couvercles qu'on y visse. La troisième ouverture est munie d'une pièce de métal perforée qui est fermée au

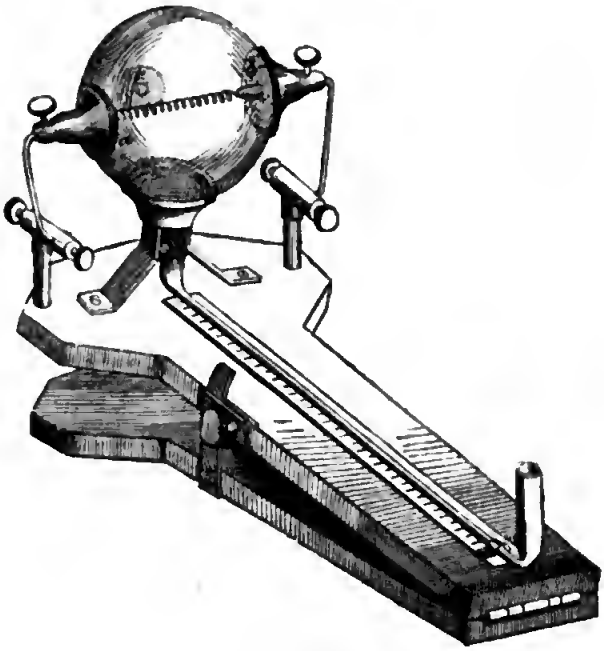


Fig. 195.

moyen d'un bouchon métallique; elle sert à laisser entrer dans le tube une colonne liquide de la longueur voulue. Dans les deux douilles entrent sans frottement deux cylindres de 7 centimètres environ de longueur sur 5 millimètres de diamètre, munis à leur extrémité extérieure d'un écrou. A leur extrémité intérieure se trouve un cône qui est fixé au moyen d'une vis; la base de chacun des deux cônes est incisée, et c'est dans ces fentes qu'on introduit par ses deux extrémités le fil de platine dont on veut déterminer l'échauffement. Une tige de métal, qu'on passe aisément à travers le ballon, sert à introduire le fil de platine qu'elle entraîne; après qu'on l'a enlevée, on tend le fil au moyen des écrous. De gros fils de laiton mettent dans le circuit de la batterie les couvercles des douilles et le fil de platine; celui-ci en s'échauffant par la décharge dilate l'air du ballon et chasse le liquide du tube dans le réservoir. L'instrument est d'autant plus sensible que, à conditions égales, l'inclinaison du tube vers l'horizon est plus grande. Dans l'appréciation de l'échauffement du fil, on néglige le refroidissement de l'air causé par les parois du ballon pendant le

temps, en général très-court, de l'abaissement du liquide; on entoure cependant la surface de la boule d'une enveloppe très-mince de gutta-percha recouverte d'une lame d'étain, afin de prévenir les variations de température qui pourraient provenir de causes extérieures. Maintenant on conclut, au moyen d'une formule fondée sur les lois de la chaleur, l'accroissement de température qu'a éprouvé le fil, de l'espace parcouru par le liquide évalué en divisions linéaires (lignes ou millimètres) [1]. Après avoir fini une expérience on ouvre le ballon et on laisse le fil se refroidir; puis on remet le bouchon de métal doucement à sa place. Si le refroidissement a été complet, le liquide, après être descendu dans le tube d'une certaine quantité, s'arrête; sinon il recommence à monter. Il faut observer qu'on ne doit pas choisir les températures initiales trop différentes les unes des autres dans les expériences qu'on veut comparer entre elles; car l'échauffement du fil de platine dépend, dans une certaine mesure, de sa température primitive et on ne peut en tenir compte, ce qui fait qu'il est important que cette température soit toujours à peu près la même. Dans les expériences de Riess, elle était de 15° environ.

Pour établir le rapport qui existe entre la force d'une décharge et son effet calorifique, il faut d'abord avoir un moyen de mesurer la quantité d'électricité dont une batterie est chargée. On se sert pour cela de la bouteille électrométrique (fig. 196) qui est une bouteille de Leyde, dont la tige métallique, qui communique avec l'ar-

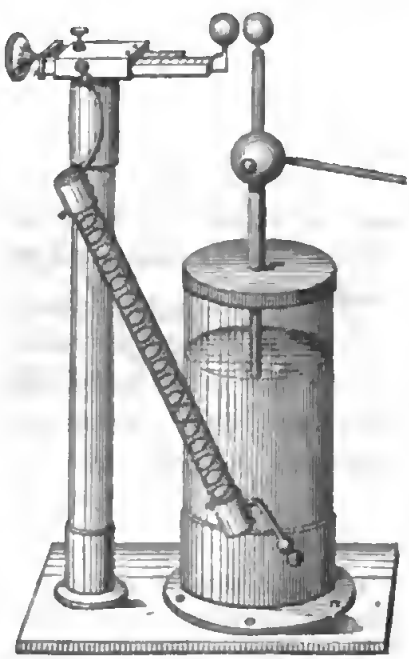


Fig. 196.

[1] Voyez, pour l'établissement de cette formule et son application à quelques cas, la note finale D.

mure intérieure, est munie de deux boules, l'une, l'inférieure, destinée à être mise en communication avec l'armure extérieure de la batterie qu'on a soin d'isoler, l'autre, la supérieure, placée vis-à-vis d'une boule parfaitement semblable, située à la même hauteur, et fixée à une tige qu'on peut faire mouvoir au moyen d'une vis micrométrique, de façon que les deux boules puissent être rapprochées l'une de l'autre d'une distance mesurable avec une grande précision. Cette dernière boule, étant isolée, est mise en communication avec l'armure extérieure de la bouteille, au moyen d'un fil de platine d'un peu plus d'un mètre de longueur, et de 0,1 mill. de diamètre, contourné autour d'un tube, afin de rendre moins vives les décharges qui ont lieu entre les deux boules[1], et de diminuer ainsi les altérations qu'éprouve leur surface qui doit être bien polie. Il est, en effet, nécessaire que ces boules, qui sont de cuivre, soient bien rondes et bien polies, afin que la décharge entre l'armure extérieure et l'armure intérieure de la bouteille ait toujours lieu avec la même quantité d'électricité. La bouteille repose sur un pied métallique, dont la communication avec le sol est établie aussi bien que possible.

Maintenant, pour se servir de la bouteille électrométrique, on fait communiquer avec son armure intérieure l'armure extérieure de la batterie qui a été isolée avec soin; l'électricité de cette armure extérieure, qui est chassée dans la bouteille, est de même nom que celle dont on charge la batterie elle-même, et elle lui est proportionnelle[2], de sorte qu'en mesurant l'une on a la mesure de l'autre. Or, dès que la bouteille électrométrique est chargée d'une quantité déterminée d'électricité, il s'opère une décharge entre les deux boules; le nombre de ces

[1] Il ne faut pas employer un fil plus long et plus mince, car les décharges, qui doivent être comptées, ne seraient pas assez fortes ni assez distinctes.

[2] La méthode repose sur le principe des électricités condensées (tome I, page 582); savoir que si la quantité 1 d'électricité, arrivant à la batterie en développant m dans l'armure extérieure, donne lieu à une décharge de la bouteille électrométrique, u décharges provenant de $u\,m$ électricité dans l'armure extérieure, correspondent à la quantité u d'électricité arrivant à la batterie.

décharges sert donc de mesure à la quantité d'électricité introduite dans la batterie. Pour que ces décharges correspondent à des quantités égales d'électricité, il faut que la communication entre l'armure extérieure de la batterie et l'armure intérieure de la bouteille soit bien établie et continue, et que la rotation du plateau de verre de la machine électrique, qui charge la batterie, ait lieu avec une vitesse aussi uniforme que possible. Il faut aussi avoir soin de rapprocher assez les deux boules de la bouteille électrométrique pour que les décharges aient lieu avec des quantités peu considérables d'électricité, ce qui rend plus exacte l'application du principe qui sert de base à ce moyen de mesure. La grandeur q, qui exprime la quantité d'électricité dont la batterie est chargée, a donc pour unité la quantité d'électricité qui, conduite dans la batterie, produit une décharge de la bouteille électrométrique, mais comme cette unité est très-faible quand on place, par exemple, les deux boules de la bouteille à 1 millimètre de distance l'une de l'autre, on prend pour unité la quantité d'électricité qui correspond à *deux* décharges.

Outre la *quantité* d'électricité, il importe de connaître sa *densité*, laquelle dépend de l'étendue s de l'armure intérieure de la batterie, ou, ce qui revint au même, du nombre des bouteilles égales dont la batterie est composée. Pour une même quantité d'électricité, cette densité est inverse de cette étendue ou de ce nombre, de sorte qu'on peut l'exprimer par la fraction $\frac{q}{s}$. La densité peut être déterminée directement au moyen d'un électromètre à poids (fig. 197) formé d'une tige de verre longue de 33 centimètres, munie à son centre d'un ajustage à deux pivots qui reposent sur deux plans d'agate comme le fléau d'une balance. A l'une des extrémités de cette tige est fixé le bassin d'une balance, à l'autre une boule métallique creuse de 17 millimètres de diamètre. Le fléau doit avoir naturellement une direction horizontale; il est placé de façon que la boule qui le termine soit immédiatement au-dessous d'une boule un peu plus grande qui communique au moyen d'un bon conducteur avec l'armure intérieure de la batterie, et qu'elle soit même en

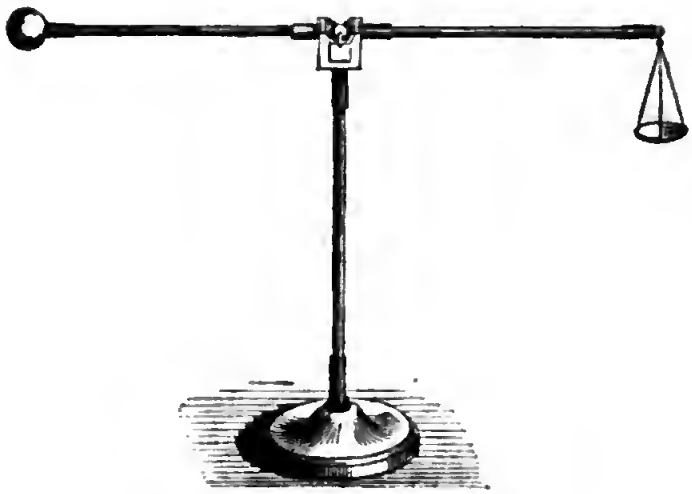


Fig. 197.

contact avec elle. On met dans le bassin un poids p et on charge la batterie jusqu'à ce que la boule fixe repousse celle de l'électromètre à poids qui était en contact avec elle. Le nombre des décharges de la bouteille électrométrique indique quelle a été la quantité d'électricité nécessaire pour opérer cette répulsion, et par conséquent pour faire équilibre au poids p. Mais l'effet répulsif est proportionnel au produit des réactions ou des densités électriques des deux boules, qui sont les mêmes, c'est-à-dire $\frac{q}{s}$ pour chacune; on a donc : $p = a\left(\frac{q}{s}\right)^2$, a étant une quantité constante; d'où l'on tire $q = s\,b\sqrt{p}$, b étant une constante égale à $\frac{1}{\sqrt{a}}$. On trouve, en prenant la moyenne de toutes les valeurs calculées, $b = 2{,}236$. Puis, comparant les valeurs de q calculées par cette formule avec ses valeurs observées, on les trouve parfaitement concordantes; ce qui prouve que la densité est bien exactement exprimée en la faisant égale à $\frac{q}{s}$. Ce même électromètre à poids peut servir d'appareil de décharge avec une légère modification dans sa construction, qui consiste à placer la boule mobile entre deux boules fixes communiquant l'une avec

l'armure extérieure, l'autre avec l'armure intérieure de la batterie, de façon que la boule mobile, qui est elle-même en communication, au moyen de la tige mobile métallique, avec l'armure extérieure, est repoussée par l'une des boules fixes et attirée par l'autre, jusqu'à la distance nécessaire pour que la décharge ait lieu (fig. 198)[1].

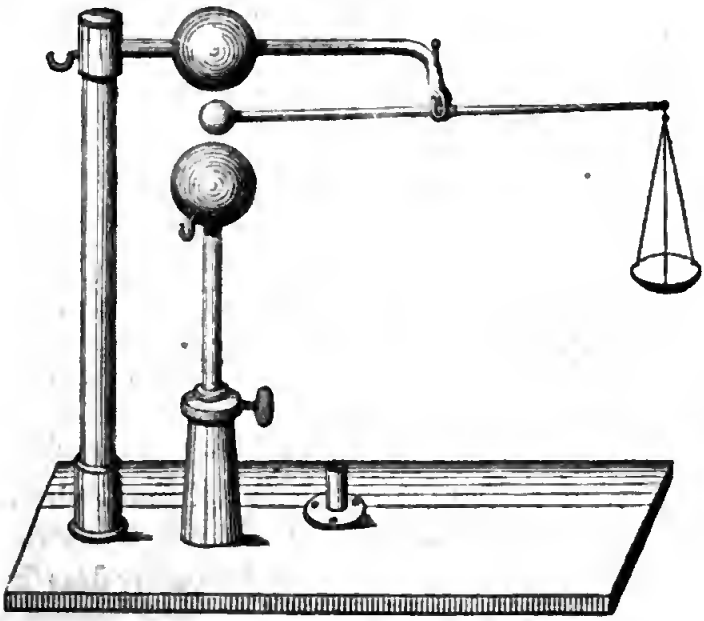


Fig. 198.

Maintenant, pour opérer, on dispose la batterie, l'appareil dé-

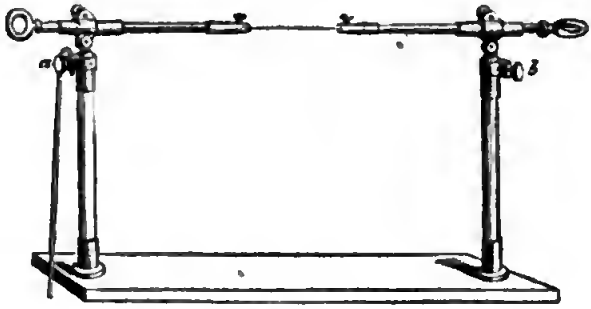


Fig. 199.

chargeur, la bouteille électrométrique et le thermomètre élec-

[1] Ces appareils sont, à quelques modifications près, les mêmes que ceux décrits au tome I, pages 114 et 115.

trique de façon que la décharge, dont on mesure la puissance par la bouteille, traverse le fil du thermomètre. On met également dans le circuit l'excitateur universel (fig. 199) pour pouvoir y intercaler d'autres fils que celui qui est échauffé dans le thermomètre. On a soin de compter le nombre des décharges de la bouteille électrométrique, jusqu'au moment où l'on est arrivé à la charge de la batterie voulue pour que le déchargeur agisse. Il vaut mieux dans des expériences très-délicates se servir d'un déchargeur (fig. 200) qu'on fait agir directement en tirant un cordon de soie attaché au bras du levier, quand on a chargé la batterie de la quantité d'électricité nécessaire.

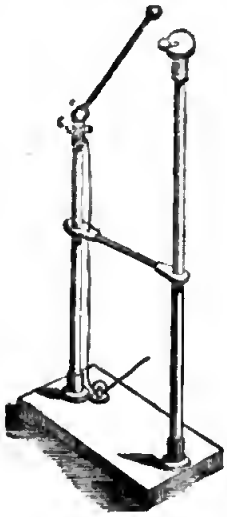


Fig. 200.

Les expériences furent faites avec une batterie dont le nombre des bouteilles varia de 2 à 25, chaque bouteille ayant environ 16 décimètres carrés (1p $\frac{1}{2}$ carré) de surface. La quantité d'électricité accumulée dans la batterie fut accusée par le nombre des étincelles d'une bouteille électrométrique, dont les boules étaient à une ligne de distance l'une de l'autre. Les nombres donnés par le thermomètre électrique sont parfaitement d'accord avec ceux que donnerait la formule $T = b\frac{q^2}{s}$, dans laquelle T exprime l'élévation de température éprouvée par le fil du thermomètre, q la quantité d'électricité, s la surface de la batterie et b une constante qui dépend du thermomètre électrique. De là on déduit la loi que *l'élévation de la température qu'éprouve un fil métallique placé dans le circuit de la décharge d'une batterie est proportionnelle au produit de la quantité d'électricité par la densité* $= q \times \frac{q}{s}$; ou, ce qui revient au même, *au carré de la quantité d'électricité accumulée dans la batterie, divisé par l'étendue de la batterie.*

Maintenant il s'agit de déterminer l'influence des dimensions du fil sur son réchauffement, le circuit de la batterie restant constant. Dans ce but, des fils de platine de différentes longueurs, tournés en hélice, sont successivement introduits dans la boule du thermomètre électrique, et on emploie une batterie composée de 5 des bouteilles de 16 décimètres carrés de surface. On trouve, par une nombreuse série d'expériences, le réchauffement de chaque fil correspondant à différentes valeurs de q, d'où l'on déduit la valeur de ce réchauffement pour $q = 1$ et $s = 1$. Voici le tableau de cette valeur pour les différentes longueurs de fil :

Longueur du fil.	Réchauffement du fil.
278 millimètres.	0.238
216	0.228
151	0.239
95	0.237

Il résulte de là que le réchauffement qu'un fil de platine éprouve par la décharge électrique est indépendant de sa longueur. Pour arriver à ce résultat, il faut avoir soin d'intercaler dans le circuit, quand on opère avec les fils plus courts que le premier, un fil semblable mais d'une longueur telle que la somme des deux fils placés en même temps dans le circuit soit toujours la même. De cette manière, il n'y a point de différence dans la résistance que rencontre la décharge, ni dans sa durée, pour chaque expérience ; si on ne prend pas cette précaution, le fil le plus long s'échauffe un peu moins, parce qu'il opère sur le temps de la décharge un retard plus grand que celui qui résulte de l'interposition du fil court, à moins qu'en même temps on ne compense la différence par le moyen que nous venons d'indiquer. Il en est de même pour la détermination de la loi relative à l'influence des diamètres des fils ; il faut, dans ce cas, opérer avec deux fils de diamètres différents, dont on met un dans le thermomètre et l'autre quelque part dans le circuit; puis, après quelques expériences faites ainsi, on change de place les deux fils et on fait de nouvelles expériences. La résistance du circuit demeure ainsi la même dans chaque série d'expé-

riences, ce qui fait que le temps de la décharge est le même pour chacun des fils dont on veut connaître le réchauffement. On trouve de cette manière en comparant les fils deux à deux :

Rayon du fil en lignes [1].	Réchauffement.
0. 029690	0°. 1588
0. 023012	0 . 3196
0. 058304	0 . 0592
0. 036170	0°. 3775

Si l'on compare les valeurs des réchauffements avec celles des rayons, on trouve qu'elles sont inverses des quatrièmes puissances des rayons. Cette loi donnerait, en effet, pour le réchauffement du premier fils calculé d'après celui du second, 0,155 au lieu de 0,158, et pour celui du troisième calculé d'après celui du quatrième, 0,0589 au lieu de 0,0592 [2]. Les différences entre le résultat du calcul et celui des observations sont tout à fait négligeables dans des expériences pareilles. On peut donc regarder comme bien établie la loi suivante : *Quand la même quantité d'électricité, complétement déchargée dans le même intervalle de temps, traverse des fils de même nature, mais de dimensions différentes, chaque fil éprouve une élévation de température indépendante de sa longueur et proportionnelle à la quatrième puissance de son rayon.*

Cette loi nous prouve d'abord que chaque fil reçoit, par la même décharge, une quantité de chaleur proportionnelle à sa longueur, ou, en d'autres termes, que chacun de ses points est également échauffé, ce qui d'avance devrait paraître vraisemblable, puisqu'il y a toujours dans le circuit un fil d'une longueur constante, dont seulement une proportion plus ou moins considérable est renfermée dans la boule du thermomètre électrique, lequel s'échauffe en raison de la longueur de cette portion. La loi nous montre en second lieu que le fil reçoit, par la décharge, une quantité de chaleur qui est en raison inverse du

[1] Ces rayons ont été déterminés avec beaucoup de soin, sous un microscope composé, d'un grossissement de 190, à l'aide d'un micromètre à vis qui accusait la dix-millième partie d'un pouce.

[2] Ces calculs ont été faits au moyen des logarithmes.

Digitized by Google

carré de son rayon, ce qui est une preuve que l'influence de sa grosseur ne consiste pas seulement en ce que la masse du fil à échauffer étant plus considérable, il doit en résulter, pour lui, une température moindre, mais en ce que, par l'effet de son plus grand diamètre, l'électricité en le traversant y dépose une quantité absolue de chaleur moins grande ; les deux influences dépendant chacune séparément du volume du fil, leur action combinée doit être proportionnelle au carré de la section ou à la quatrième puissance du diamètre.

Dans la loi que nous venons d'énoncer, la quantité d'électricité transmise est toujours la même dans le même temps; maintenant il s'agit de déterminer l'influence qu'exercent sur le réchauffement d'un fil invariable une différence dans cette quantité, ou, ce qui revient au même, les dimensions variables d'un autre fil placé dans le même circuit, dont on fait varier la longueur et le diamètre ; l'expérience démontre que le réchauffement du fil invariable est inverse de la longueur du fil ajouté et proportionnel au carré de son rayon : or, c'est exactement la loi qui régit la conductibilité électrique du fil ; d'où on doit conclure que le réchauffement du fil invariable est inverse de la résistance que rencontre la décharge, ou réciproquement proportionnel à sa durée. Cette dernière conséquence résulte de l'observation qui démontre que, plus on augmente la résistance que rencontre la décharge en introduisant dans son circuit, soit un fil très-long, soit un tube rempli d'eau ou un petit cylindre de bois mouillé, moins le fil s'échauffe; il finit même par ne plus s'échauffer du tout, et une très-grande quantité d'électricité peut le traverser sans affecter en rien le liquide indicateur du thermomètre. Mais alors la décharge n'est plus instantanée; elle dure un intervalle de temps appréciable; et si l'on suppose que le retard qu'elle éprouve soit proportionnel à la résistance du conducteur intercalé, et, par conséquent, dans le cas d'un fil métallique homogène, à sa longueur, on trouve que les valeurs du réchauffement, calculées d'après une formule basée sur cette supposition, sont parfaitement d'accord avec les valeurs observées. Le même accord existe entre le calcul et l'observation, quand on intercale des fils dont le diamètre et

non la longueur est variable, si, du moins, l'on admet que le retard est inverse du carré du rayon, ce qui permet d'énoncer la loi comme suit :

Le réchauffement d'un fil par la décharge électrique est réciproquement proportionnel à la durée de la décharge, le retard que la décharge éprouve par l'insertion d'un fil dans le circuit étant lui-même en raison directe de la longueur du fil et en raison inverse du carré de son rayon.

En réunissant toutes les lois que nous venons d'établir, on est conduit à celle-ci plus générale :

L'élévation de température de la section normale d'un fil homogène inséré dans le circuit d'une batterie est en raison inverse de la quatrième puissance de son rayon, et en raison directe de la quantité d'électricité accumulée, divisée par le temps de la décharge : $T = \frac{a}{r^4} \times \frac{q}{z}$, a étant une constante qui dépend de la nature du fil, r le rayon du fil, q la quantité d'électricité, et z le temps de la décharge[1]. On voit que la longueur du fil

[1] Quand on introduit dans le thermomètre électrique un fil très-fin, et qu'on augmente graduellement la charge de la batterie en diminuant en même temps le nombre des bouteilles, on remarque, lors même que la quantité totale d'électricité ne change pas, que le réchauffement du fil va en croissant, et que le fil lui-même éprouve des inflexions et finit par être tout bosselé, déformation qu'on ne peut faire disparaître que par l'incandescence et la politure. Cet accroissement d'effet produit par la même quantité d'électricité d'une densité croissante, il est vrai, ne peut être attribué qu'à une augmentation dans la rapidité de la décharge, et la supposition la plus simple est d'admettre que le temps de la décharge est inversement proportionnel à la densité de l'électricité. En appelant y la densité déterminée par la balance de tension de l'électromètre à poids, si la quantité t d'électricité est déchargée dans le temps $\frac{t}{y}$, la quantité q le sera dans le temps $\frac{q}{y}$; par conséquent z, le temps de décharge de la batterie est proportionnel à $\frac{q}{y}$. Mais nous avons vu que y la densité est égal à $\frac{q}{s}$; donc $z = \frac{q}{y}$ sera égal à $q \times \frac{s}{q} = s$. D'où il résulte que dans la formule $T = b\frac{q^2}{s}$ on peut remplacer s par z, et mettre $T = b\frac{q^2}{z}$.

n'entre ni dans la loi ni dans la formule, ce qui est une conséquence de la loi relative à la longueur que nous avons établie plus haut, puisque, comme nous l'avons remarqué, l'influence de la longueur ne se fait sentir que sur la durée de la décharge dont z est l'expression. La formule qui donne la valeur z renferme la longueur du fil intercalé dans le circuit, mais cette formule un peu compliquée ne donne pas pour z une valeur nulle quand la longueur du fil devient nulle. Cette conséquence, bizarre au premier coup d'œil, s'explique cependant quand on songe que le circuit ne se compose pas seulement de fils, mais aussi des points d'attache de ces fils qui subsistent toujours, de sorte que le temps donné par la formule, quand le fil est réduit à une longueur nulle, est celui dont la décharge a besoin pour traverser les parties invariables de l'appareil et les pièces de jonction qui les lient ensemble; c'est ce temps-là qui est pris pour unité.

L'échauffement d'un fil est aussi influencé par des interruptions dans le circuit, telles que celles qui résultent de l'interposition d'une couche d'air, d'une feuille plus ou moins épaisse de carton, d'une lame de verre ou de mica entre les deux extrémités de l'excitateur entre lesquelles la décharge doit passer; et les expériences conduisent au résultat suivant : *la décharge électrique échauffe le fil qu'elle traverse d'autant moins que l'électricité doit franchir un plus grand obstacle avant que la décharge parte.* Il ne s'agit pas ici d'un obstacle qui retarde la décharge continuellement, ce que ferait un mauvais conducteur, mais d'un obstacle qui, tant qu'il n'est pas surmonté, rend impossible toute transmission d'électricité. Or, comme le réchauffement dépend à la fois de la quantité de l'électricité et de sa vitesse, et que la quantité n'est pas diminuée sensiblement par la présence de l'obstacle, il faut en conclure que l'obstacle, quoiqu'il soit franchi, augmente la durée de la décharge.

Enfin, une circonstance importante à laquelle il faut avoir égard dans le réchauffement d'un fil par la décharge, c'est l'influence des courants d'induction qui peuvent être développés dans des conducteurs rapprochés de ceux que parcourt la décharge. Riess a fait également une étude très-détaillée de cette influence, en plaçant dans le circuit un fil conjonctif roulé en

spirale, et près de cette spirale un autre fil indépendant de la batterie, roulé également en spirale, ou simplement une lame mince d'étain interposée entre deux plaques de verre. L'effet de ce conducteur extérieur sur la puissance calorifique de la décharge ne se fait sentir qu'autant que sa conductibilité est inférieure à celle du fil conjonctif, et l'expérience montre qu'alors *la décharge est d'autant plus retardée, et par conséquent le réchauffement du fil thermométrique d'autant moindre, que la conductibilité du circuit extérieur est moindre.* Cependant la diminution du réchauffement dans le circuit principal, qui résulte de l'augmentation de résistance que présente le circuit secondaire fermé, a une limite à laquelle on parvient en augmentant la longueur d'un fil d'argentane, par exemple, qui fait partie de ce circuit. Les deux spirales semblables, formées toutes les deux d'un fil de cuivre de 1^{mm}, 5 de diamètre et de 422 centimètres de longueur, dont l'une fait partie du circuit principal, l'autre du circuit secondaire, sont placées à 2 millimètres de distance l'une de l'autre; le fil d'argentane qui unit les deux extrémités de cette seconde spirale a une longueur de 9 mètres 50 centimètres; le réchauffement éprouve une diminution de 52 pour cent; c'est le maximum de la diminution. Pour des longueurs plus considérables, le réchauffement se rapproche de ce qu'il était primitivement, et quand le fil d'argentane est long de 190 mètres environ, la diminution du réchauffement n'est plus que de 13 pour cent. La diminution du réchauffement ne dépend pas seulement de la conductibilité du circuit secondaire, elle est aussi très-influencée par celle du circuit principal, et en particulier par la résistance qu'offre au passage de l'électricité, à cause de sa ténacité, le fil de platine du thermomètre. Ainsi, si l'on fait passer la décharge par un fil de platine moins long et plus gros que l'on place dans l'axe de l'hélice d'un thermomètre de Bréguet, on trouve, au moyen des indications de ce thermomètre, que la diminution d'échauffement peut s'élever sous l'influence du circuit secondaire à 86 pour cent de l'effet primitif qu'on obtenait quand le circuit secondaire n'existait pas ou n'était pas fermé.

Dans toutes ces expériences, le circuit secondaire n'agit qu'en

conséquence de sa faculté conductrice, car on obtient exactement les mêmes effets en remplaçant le fil d'argentane par un de platine, qui oppose le même obstacle au passage de l'électricité.

Les faits qui précèdent confirment ce que nous avons dit sur la durée de la décharge. En effet, le courant produit par induction dans le fil secondaire, quoiqu'un peu en retard par rapport au commencement de la décharge, réagit néanmoins sur une partie de cette décharge, en retarde le mouvement et en diminue par conséquent le pouvoir échauffant. La prolongation du circuit a le double effet, en premier lieu, de ralentir le courant induit et d'augmenter par là sa réaction sur le fil principal; en second lieu, d'affaiblir ce courant et de diminuer au contraire cette même réaction. D'abord le premier effet prédomine, et l'on voit augmenter la réaction, mais bientôt le courant secondaire s'affaiblit tellement que son influence disparaît de plus en plus, jusqu'à devenir nulle pour une certaine longueur qui équivaut à une interruption complète du circuit. Au reste, nous n'insisterons pas davantage sur ce point particulier, qui est lié aux propriétés des courants induits, sujet que nous avons déjà traité en détail [1], et sur lequel nous ne sommes revenu ici que parce qu'il nous montre sous une autre forme l'influence remarquable de la durée ou de la vitesse de transmission de l'électricité sur sa puissance calorifique.

Enfin nous ne nous étendrons pas non plus sur une classe de phénomènes, qui montrent sous une autre forme l'influence remarquable qu'exercent sur le réchauffement la densité et la durée des décharges. Il s'agit des effets calorifiques qu'on obtient avec les batteries de Franklin, lesquelles sont formées d'une série de bouteilles de Leyde mises en communication les unes avec les autres, de façon que le bouton de la première communique avec le conducteur de la machique électrique, le bouton de la suivante avec l'armure extérieure de la première, et ainsi de suite [2]. Le réchauffement du fil produit par la décharge d'une semblable batterie a conduit Riess, à la

[1] Tome I, pages 406 et suivantes.
[2] Voyez tome I, p. 112, figure 58.

suite d'un grand nombre d'expériences, à des résultats remarquables sur la densité que possède l'électricité dans les diverses bouteilles dont elle se compose, et sur l'influence de cette densité[1].

Après avoir exposé les lois générales qui régissent le réchauffement opéré par les décharges dans les bons conducteurs, il nous reste à examiner quelle est l'influence sur ce réchauffement de la nature particulière de ces conducteurs, qui sont dans nos expériences des fils métalliques. C'est encore à Riess que nous devons d'avoir, par ses expériences aussi nombreuses que précises, déterminé cette influence. Cette détermination a été faite pour chaque fil au moyen de deux expériences : dans l'une, le fil soumis à l'épreuve, par exemple un fil de plomb, était placé dans le circuit de la décharge où se trouvait aussi le fil de platine du thermomètre électrique; dans l'autre, le fil de plomb était dans le thermomètre, et le fil de platine du thermomètre dans le circuit. De là, il était facile de déduire, au moyen des lois déjà établies et en tenant compte du diamètre des deux fils, le réchauffement du fil de plomb relativement à celui du fil de platine; on opérait de même pour chacun des autres, et on arrivait au tableau suivant :

MÉTAUX.	FORCE DE RALENTISSEMENT.	POUVOIR DE RÉCHAUFFEMENT.	QUANTITÉS de CHALEUR DÉGAGÉES.
Argent.	0.1043	0.1267	0.1120
Cuivre.	0 1552	0.1133	0 1447
Or.	0.1746	0,2112	0.1847
Cadmium.	0.4047		
Laiton.	0.5602	0.3861	0.5616
Palladium.	0.8535		
Fer.	0.8789	0.7080	0,9148
Platine.	1.0000	1.0000	1.000
Étain.	1.053	1.570	0,8917
Nickel.	1.180	0.8727	1.182
Plomb.	1.503	2.876	1.455

[1] Voyez la note finale D, pour les détails relatifs aux lois du réchauffement des fils par les décharges électriques.

La comparaison qu'on peut faire entre les deux espèces de valeurs que renferment pour un même métal les deux premières colonnes de la table ci-dessus montre qu'il n'y a pas de rapport direct entre elles. Mais on arrive à un résultat plus satisfaisant en transformant les nombres de la seconde colonne, qui expriment les élévations relatives de température, en quantités relatives de chaleur. Pour cela, il faut multiplier chacune de ces valeurs par la chaleur spécifique et la densité du métal auquel elle se rapporte, et diviser le produit par le produit de la chaleur spécifique et de la densité du platine, qui est toujours pris pour unité. On obtient ainsi les quantités de chaleur relatives que la décharge électrique développe dans chaque métal, celle qui est développée dans le platine étant prise pour unité; la troisième colonne de la table ci-dessus renferme ces valeurs. On voit qu'elles diffèrent très-peu des nombres qui expriment la force de ralentissement, de sorte que cette force, et la quantité de chaleur développée dans un métal, peuvent être regardées comme proportionnelles l'une à l'autre, et que, lorsqu'on a déterminé pour un métal la première de ces deux valeurs, ce qui est toujours facile, on peut facilement en déduire la seconde, et par conséquent le pouvoir de réchauffement des métaux. Voici la règle générale :

On trouve le pouvoir relatif de réchauffement électrique d'un métal en divisant sa force de ralentissement électrique par sa chaleur spécifique et par sa densité.

Il résulte de la combinaison de toutes ces diverses lois, qu'on peut exprimer par une formule générale la quantité de chaleur dégagée dans chacun des fils métalliques qui, liés bout à bout, composent une chaîne à travers laquelle passe la décharge électrique. Cette formule conduit au principe suivant :

Dans des fils métalliques quelconques liés à la suite les uns des autres, et qui servent en même temps à décharger une batterie électrique, il se dégage des quantités de chaleur qui sont exactement proportionnelles aux ralentissements que chacun de ces fils pris séparément produirait sur une décharge électrique quelconque. Ce principe général, et la formule qui y a conduit, s'appliquent

également au cas le plus simple, celui d'un seul fil mis dans le circuit, et on obtient ainsi la quantité de chaleur dégagée dans ce fil.

Si les fils métalliques qu'on met successivement les uns après les autres dans le circuit de la batterie sont de même diamètre, et qu'on leur donne des longueurs qui soient en raison inverse de leur force de ralentissement, la formule indique la même quantité de chaleur pour chacun d'eux, pourvu que l'accumulation d'électricité dans la batterie soit la même. Ainsi, supposons que l'on décharge successivement une batterie électrique avec des fils de même diamètre et de nature différente, dont les longueurs soient, pour chaque métal, inverses de sa force de ralentissement, et représentées, par conséquent, par les nombres du tableau ci-joint : savoir, par exemple, 148, 7 pouces pour le fil d'argent, 88, 8 pour le fil d'or, 15, 5 pour le fil de platine; on trouvera, il est vrai, que tous ces fils éprouvent, par l'effet de la décharge, des élévations de température très-différentes, mais que, si on les suppose entourés de glace pendant l'expérience, ils en auront fondu, pour revenir à leur température primitive, exactement la même quantité, c'est-à-dire que la quantité totale de chaleur dégagée chez chacun d'eux aura été la même; ce qui explique pourquoi leur température est d'autant plus élevée qu'ils sont plus courts.

Table des valeurs inverses de la force de ralentissement, cette force étant de 100 pour le cuivre.

Argent.	148.7
Cuivre.	100
Or.	88.87
Cadmium.	38.35
Laiton.	27.70
Palladium.	18.18
Fer.	17.66
Platine.	15.52
Étain.	14.70
Nickel.	13.15
Plomb.	10.31

§ 4. Lois des effets calorifiques produits par le passage des courants continus à travers de bons conducteurs.

Les résultats obtenus par Riess ont eu le précieux avantage de préciser d'une manière rigoureuse cette dépendance qu'on avait déjà, avant lui, reconnu exister entre les effets calorifiques de l'électricité dynamique d'une part, et la quantité et la vitesse de cette électricité d'autre part. C'était en étudiant la puissance calorifique du courant voltaïque qu'on avait découvert cette dépendance, sans cependant en avoir établi exactement les lois. Ainsi, j'avais déjà montré en 1830 que la raison pour laquelle une pile à grandes surfaces, composée de couples nombreux, était préférable à une pile formée d'un grand nombre de couples à surfaces moindres, pour le développement de la chaleur dans des fils métalliques placés dans leur circuit, était que le courant dans le premier cas avait une plus grande vitesse, et qu'il fallait, pour que l'effet calorifique fût à son maximum, que la résistance de la pile ne dépassât pas celle du fil placé entre ses pôles. Plus tard, je fis voir que l'effet calorifique diminuait avec l'intensité ou la vitesse de l'électricité, dans une proportion beaucoup plus forte que cette intensité ou cette vitesse. Pour cela, ayant mis l'hélice du thermomètre de Bréguet [1] dans le circuit d'une pile de huit couples de zinc et de cuivre, qui avaient chacun 0 m 21 carrés de surface, et qui étaient chargés avec un mélange de 40 parties d'eau, de 2 d'acide sulfurique et d'une d'acide nitrique, je fis passer le courant à travers une certaine étendue d'acide nitrique concentré, placée dans une auge prismatique en verre, et qu'on pouvait séparer en deux ou plusieurs compartiments au moyen de diaphragmes en platine. Un galvanomètre magnétique à gros fil était également dans le circuit. Voici les résultats :

[1] Tome I, page 31, fig. 21.

NOMBRE DES DIAPHRAGMES.	GALVANOMÈTRE MAGNÉTIQUE.	VOLTAMÈTRE CALORIFIQUE.
1	85	312°
2	84	170
3	83	115
4	75	12°
5	40	0°
6	37	0°

En interposant dans le circuit un voltamètre chimique au lieu d'un magnétique, on obtient les résultats suivants :

NOMBRE DES DIAPHRAGMES.	VOLTAMÈTRE CHIMIQUE [1].	VOLTAMÈTRE CALORIFIQUE.
0	5″	38°
1	25″	3°

[1] Le nombre de secondes indique pour le voltamètre chimique le temps nécessaire pour obtenir un même volume de gaz; il est donc inverse du pouvoir chimique du courant.

Ainsi, la réduction de l'effet calorifique à $\frac{1}{12}$ correspond à une réduction seulement de $\frac{1}{5}$ de l'effet chimique. En supposant donc que, soit l'effet magnétique, soit l'effet chimique, soient dans un rapport simple avec l'intensité et la vitesse du courant, on voit dans quelle proportion plus forte l'effet calorifique diminue ou augmente avec cette intensité ou cette vitesse.

Avant d'aller plus loin, observons qu'il y a dans les effets calorifiques de l'électricité dynamique une distinction importante à faire entre le cas des décharges et celui des courants continus. Dans le premier, la vitesse ne dépend, pour une même quantité d'électricité, que des conducteurs qui forment l'arc de clôture de la batterie et de l'étendue de sa surface; dans le second, elle dépend en outre de la constitution même de l'appareil producteur. Et, en effet, quand cet appareil est une pile voltaïque,

celle-ci fait partie du circuit traversé par le courant, aussi bien que le fil qui s'échauffe et que tous les conducteurs qui font communiquer les deux bouts de ce fil avec les pôles, tandis qu'avec une batterie de bouteilles de Leyde il n'en est plus de même. Une autre différence, qui rend toute comparaison difficile, c'est que la décharge doit être instantanée, tandis que le courant a une certaine durée, tellement que l'écoulement lent de la même quantité d'électricité ne produit point le même effet calorifique quand cette électricité, au lieu de provenir d'une pile, provient d'une machine électrique ou d'une batterie[1]. Néanmoins, comme nous allons le voir, quelques-unes des lois qui régissent les phénomènes calorifiques quand ils sont produits par un courant continu sont les mêmes que pour le cas où ce sont les décharges qui leur donnent naissance. C'est ce qui résulte des recherches de trois physiciens, Joule, Lenz et E. Becquerel.

Joule mesure les quantités d'électricité par un galvanomètre à tangentes qu'il place dans le circuit; puis il transmet le courant à travers un fil de cuivre qu'il fait passer dans un tube de verre et contourne ensuite en hélice autour de ce tube, qui est lui-même placé dans un vase contenant une certaine quantité d'eau. Voici maintenant le tableau des résultats :

DÉVIATION du GALVANOMÈTRE.	QUANTITÉS d'électricité dynamique[1].	RÉCHAUFFEMENT de l'eau dans une demi-heure.	RAPPORTS entre les carrés des quantités d'électricité de la colonne n° 2.
16°	0°.43 Q		
31 ½	0 .92 Q	3°	2.9
55	2 .35 Q	19.4	18.8
57 ¾	2 .61 Q	23	23.2
54 ¼	2 .73 Q	25	25.4

[1] M. Joule prend pour l'unité de mesure de la quantité d'électricité dynamique, la quantité d'électricité capable de décomposer cent grains d'eau par heure; elle est produite par un courant capable de dévier son galvanomètre de 35°.5. C'est cette unité que M. Joule appelle Q.

[1] Nous reviendrons sur ces différences en nous occupant de l'incandescence des fils, phénomène dans lequel elles sont surtout sensibles.

L'expérience, prolongée pendant une heure, donna un résultat d'accord avec celui renfermé dans le tableau; ce qui prouve que la chaleur, dégagée par le courant dans son passage à travers le fil métallique, est bien proportionnelle au carré de l'intensité électrique. D'un autre côté, quelques expériences faites avec des fils de diverse nature, savoir un fil de cuivre, un fil de fer et un filet de mercure renfermé dans un tube en verre contourné, avaient montré à M. Joule que le même courant transmis à travers deux de ces conducteurs différents, placés à la suite l'un de l'autre, produisait des quantités de chaleur qui étaient, pour le fil de cuivre comparé au fil de fer, comme 5, 5 : 6, et pour le fil de cuivre comparé au filament de mercure, comme 2, 9 : 4, 4. Ces rapports étaient exactement ceux que l'expérience directe montre exister entre les résistances électriques des conducteurs employés. D'où l'on peut conclure la loi générale suivante, que *lorsqu'un courant d'électricité voltaïque est propagé le long d'un conducteur métallique, le calorique dégagé dans un temps donné est proportionnel à la résistance du conducteur multiplié par le carré de l'intensité électrique.*

M. E. Becquerel a perfectionné la méthode de Joule, en tenant compte du refroidissement qui avait lieu pendant la durée de l'expérience, et en employant dans ce but un calorimètre dans l'eau duquel plongeait un thermomètre très-sensible et un fil métallique tourné en spirale qui était traversé par le courant[1]. La quantité d'électricité était mesurée ici par la quantité de gaz dégagée par minute dans un voltamètre qu'on ramenait à 0° et à $0^{m},76$ de pression; on faisait varier cette quantité en produisant le courant par un plus ou moins grand nombre de couples à force constante.

Trois expériences principales ont été faites suivant cette méthode : l'une avec un fil de cuivre de $0^{m},936$ de longueur et de $0^{mm},45$ de diamètre, la seconde avec un fil de platine de

[1] Cette méthode, dans laquelle on tient compte de la chaleur perdue par le refroidissement pendant la durée de l'expérience, est la même que celle dont ont fait usage de La Roche et Bérard pour la détermination de la chaleur spécifique des gaz.

$0^m,44$ de longueur et de $0^{mm},23$ de diamètre, et la troisième avec un fil de platine de $0^m,85$ de longueur et de $0^{mm},1$ de diamètre. Chacun de ces fils était tourné en hélice autour d'un tube de verre. Si l'on divise dans chacune des trois séries d'expériences les quantités de chaleur mesurées au moyen du calorimètre par le carré des quantités correspondantes d'électricité, mesurées au moyen d'un voltamètre chimique, on a comme quotients des nombres très-peu différents les uns des autres pour chacune des expériences de la même série, nombres dont la moyenne est, pour la première série, composée de six expériences, 0,0340; pour la seconde série, composée de cinq expériences, 0,1844, et pour la troisième, composée de quatre expériences 3,143. Ces résultats prouvent d'abord que la quantité de chaleur dégagée par le passage du courant est proportionnelle au carré de la quantité d'électricité qui passe; de plus, les trois nombres ci-dessus étant l'expression de la quantité de chaleur dégagée par le passage d'une même quantité d'électricité, il est facile de reconnaître qu'ils sont en raison directe de la résistance que les trois fils présentent à la transmission du courant. En effet, voici le tableau comparatif des quantités de chaleur dégagées, déduites, soit de l'expérience, soit du calcul basé sur cette hypothèse :

FILS.	Par expérience.	Par le calcul.
Fil fin de platine.	3.143	3.143
Fil gros de platine.	0.187	0.177
Fil de cuivre.	0.034	0.038

Enfin, Lenz est parvenu aux mêmes résultats que Joule et E. Becquerel, en plaçant le fil qui est échauffé par le courant dans de l'esprit de vin, conducteur encore plus imparfait que l'eau pure, ce qui fait que l'on est plus sûr qu'aucune partie du courant ne traverse le liquide, et qu'il est, par conséquent, transmis en totalité à travers le fil; certitude qu'on n'a pas avec l'eau.

Dans la figure 201, B représente le bouchon en verre du flacon rempli d'esprit de vin ; ce bouchon est percé de deux trous qui permettent d'introduire deux gros conducteurs métalliques qu'on met en S en communication avec les pôles d'une pile, et dont on réunit les extrémités intérieures par le fil fin tourné en hélice qui doit être chauffé par le courant. Un galvanomètre à tangentes et un rhéostat introduits dans le circuit servent à mesurer le courant et à en réduire la force au taux voulu dans chaque expérience. Le tableau suivant renferme les résultats de seize expériences faites avec trois fils d'argentane d'épaisseurs différentes, avec des fils de platine, de fer et de cuivre.

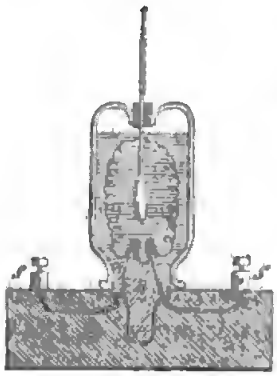


Fig. 201.

NATURE des FILS.	FORCE du COURANT.	TEMPS de l'échauffement de 1° de l'esprit de vin.	RÉSISTANCE à la conductibilité du fil.
Argentane n° 1.	6.93	1.349	93.50
«	10.53	0.571	93.63
«	14.30	0.300	93.94
Argentane n° 2.	10.53	0.920	58.76
«	14.30	0.481	58.64
«	18.32	0.288	59.01
«	14.30	0.457	60.16
Argentane n° 3.	18.32	0.384	44.59
Platine.	14.30	0.555	50.45
«	18.32	0.325	51.41
Fer.	22.69	0.435	24.92
Cuivre.	18.32	1.301	13.90
«	22.69	0.385	13.90
«	27.52	0.575	13.92
«	32.98	0.381	14.01
«	27.52	0.544	14.31

On voit, d'après ce tableau, que pour chaque fil la résistance à la conductibilité augmente légèrement avec la force du courant, ou plutôt avec son réchauffement, ce qui doit être, puisque

l'élévation de la température diminue la conductibilité électrique des métaux.

Il est facile de déduire des nombres contenus dans le tableau ci-dessus les différentes lois du réchauffement des fils par le courant électrique. D'abord, on voit que le temps t, employé par deux fils différents traversés par le même courant, pour réchauffer de 1° la même quantité d'esprit de vin, est inverse de la résistance l à la conductibilité de ces deux fils, et par conséquent que le réchauffement lui-même est proportionnel à cette résistance. En effet, on a $t \times l$ constant dans toutes les expériences faites avec un courant de même force. Voici les valeurs de ce produit pour différents courants :

Avec le courant de 10.53.

Premier fil d'argentane. . . .	$tl = 53.46$
Second fil d'argentane.	$tl = 54.06$

Avec le courant de 14.30.

Premier fil d'argentane. . . .	$tl = 28.18$
Second fil d'argentane.	$tl = 28.11$
Troisième fil d'argentane. . . .	$tl = 27.49$
Fil de platine.	$tl = 28.00$

On trouvera de même tl constant dans quatre expériences avec le courant de 18,35, et dans deux avec le courant de 22,69. Les petites différences entre les valeurs de tl dans chaque cas ne proviennent que des erreurs inévitables de l'expérience.

Les chiffres du tableau montrent aussi que le réchauffement est proportionnel au carré de la force du courant, ou, ce qui revient au même, que ce carré est inverse du temps t du réchauffement de 1°, c'est-à-dire que s^2t est constant pour chacun des six fils employés successivement dans les expériences. Les légères différences que présentent entre elles les valeurs s^2t pour chaque fil sont dues à ce que plus le réchauffement est rapide, moins la perte de chaleur provenant du refroidissement est grande, de sorte que t est nécessairement plus petit qu'il ne devrait l'être dans les cas où le courant est plus fort. Ainsi, si

nous prenons pour exemple les expériences faites avec le premier fil d'argentane, nous trouvons, pour s^2t, les valeurs suivantes : 1° 64,8; 2° 63,3, et 3° 61,3, qui vont, comme on le voit, en diminuant. Il en est de même pour les diverses valeurs de s^2t avec chacun des cinq autres fils. Pour que ces valeurs fussent bien égales avec chacun des fils, il aurait fallu tenir compte de ces différences dans l'influence du refroidissement.

Quoi qu'il en soit, nous retrouvons toujours les deux mêmes lois, savoir : que le réchauffement est proportionnel 1° à la résistance à la conductibilité du fil, 2° au carré de la force du courant. Ces deux lois combinées doivent donner comme constant, dans toutes les expériences du tableau ci-dessus, le produit $s^2\ t\ l$, puisque t est inverse du réchauffement. Or, les produits $s^2\ t\ l$ tirés des nombres fournis par les seize expériences du tableau sont sensiblement égaux, et leur valeur moyenne est 5856.

Les courants d'induction engendrés par la rotation devant les pôles d'un aimant, d'une armure de fer doux entourée d'un fil métallique, présentent, quant à leurs effets calorifiques, les mêmes lois que les courants de décharge et voltaïques. Joule a même démontré, en plongeant dans de l'eau munie d'un thermomètre l'armure de fer doux et les bobines de fil dont elle est entourée, que la chaleur développée dans les fils mêmes des bobines est proportionnelle au carré de l'intensité du courant.

Une troisième loi à ajouter aux deux autres est que, quelle que soit la longueur d'un fil conducteur, s'il transmet la même quantité d'électricité dans le même temps, l'élévation de la température de chacun de ses points est la même. Seulement, si sa longueur augmente, il faut rendre la source du courant plus énergique pour qu'il passe la même quantité d'électricité dans le même temps, de manière que la déviation d'un galvanomètre reste la même. Cette loi a été constatée pour la première fois par Peltier et confirmée par E. Becquerel.

Les trois lois que nous avons établies pour un courant continu sont les mêmes que celles que Riess avait trouvées pour le cas de la décharge [1]; cependant il y a entre ces deux modes

[1] M. E. Becquerel croit avoir trouvé que pour les courants comme pour les

de réchauffement par l'électricité une différence importante, qui rend toute comparaison entre eux très-difficile, c'est la durée du premier et l'instantanéité du second. On aurait beau accumuler sur une batterie une quantité d'électricité égale à la totalité de celle qui produit un courant capable de chauffer un fil métallique pendant une minute, cependant en faisant écouler graduellement pendant une minute cette électricité, on ne produirait point le même échauffement. On sait d'ailleurs que dans la décharge instantanée, une même quantité d'électricité produit un effet calorifique qui varie avec la surface de la batterie. La cause de ces différences gît dans la nature si différente elle-même des deux sources d'électricité, comme nous le verrons quand nous aurons étudié ces sources.

Un point important dans les recherches qui viennent de nous occuper est de savoir quelle est l'influence sur la résistance que le fil oppose au courant électrique, du réchauffement même qu'il éprouve. Nous avons vu, en effet, que cette résistance augmente avec l'élévation de la température due à une cause extérieure; or, ici le réchauffement provient de la résistance du fil, et, d'un autre côté, cette résistance augmente avec le réchauffement : où est la limite et comment s'établit l'équilibre ?

Cette question a été traitée avec détails et résolue au moyen d'un grand nombre d'expériences par M. Romney-Robinson. Les instruments dont il a fait usage sont : un galvanomètre, un rhéostat et un pyromètre très-sensible, dans le genre de celui que nous avons décrit[1], et au moyen duquel il pouvait apprécier les variations de température d'un fil métallique, d'un fil de platine en particulier. Voici un tableau des résultats obtenus avec un fil de platine de $0^{mm},2$ de diamètre et une pile composée d'un plus ou moins grand nombre de couples. La force du courant est déduite des indications du galvanomètre, le courant pris

décharges, l'élévation de température est en raison inverse de la quatrième puissance du rayon du fil; mais cette loi ne nous paraît pas encore être assez solidement établie pour pouvoir être admise; c'est ce que nous verrons dans le § 5.

[1] Tome I, page 30, figure 19.

pour unité étant celui qui, produisant sur le galvanomètre une déviation de 45°, dégage dans un voltamètre 6p,57 de gaz en 5 minutes. Le pyromètre donne la température du fil.

FORCE du COURANT.	TEMPÉRATURE DU FIL.	RÉSISTANCES du fil EN TOURS DE RHÉOSTAT.
0.809	289.7	305.5
0.858	319.9	320.8
0.957	559.3	385.2
1.168	930.9	497.9
1.214	1020.6	523.8
1.357	1215.0	591.6
1.404	1338.7	643.8
1.515	1447.0	666.4
1.538	1545.6	706.2
1.794	1761.9	734.4
2.089	1966.4	793.9
2.200	2116.0	840.5
2.222	2166.2	827.8
2.318	2461.6	898.2

Il est curieux de voir combien la résistance augmente dans une progression rapide avec la température; car à 289°,7 elle est équivalente à 305,5 degrés du rhéostat, et à 2461°,6 à 898,2.

En plaçant le pyromètre dans le vide, l'accroissement de la résistance avec la température est le même; seulement la force du courant nécessaire pour produire la même température est un peu moindre, parce que l'absence de l'air ambiant diminue le refroidissement.

Voici un tableau d'expériences semblables faites avec un fil de 0mm,4 de diamètre; il faut remarquer que la huitième expérience a été faite en plongeant le pyromètre dans de l'alcool étendu, de sorte que la température du fil n'a pu s'élever au-dessus de celle de l'ébullition de ce liquide, savoir 207° F, à peu près celle de l'ébullition de l'eau.

FORCE du COURANT.	TEMPÉRATURE du fil EN DEGRÉS F.	RÉSISTANCES en DEGRÉS DE RHÉOSTAT.
1.522	365.9	127.8
2.020	481.3	144.9
2.411	719.6	169.0
2.758	1020.7	212.0
3.226	1310.4	238.7
3.699	1518.0	270.1
4.352	1883.9	318.6
0.548	207.8	93.8
4.821	2206.7	346.0
5.230	2355.1	351.4

La huitième expérience inscrite dans ce tableau démontre que l'augmentation de résistance n'est pas due à l'accroissement d'intensité du courant, puisque le courant y est six fois plus fort que dans la première, et que le fil présente moins de résistance, mais qu'elle provient de l'élévation de température, qui, à cause de l'alcool ambiant, est beaucoup moindre dans ce cas. Elle paraît même être assez exactement proportionnelle à cette élévation de température, soit pour un fil de platine, soit pour un fil de cuivre, ces deux métaux étant les seuls sur lesquels M. Robinson ait opéré, parce que ce sont les seuls dont on ait déterminé le coefficient de dilatation pour de hautes températures[1].

L'accroissement si considérable de la résistance qui accompagne celui de la température dans un fil fait naître la question de savoir si l'effet calorifique du courant, que nous avons vu être proportionnel à la résistance qu'il rencontre, est proportionnel à cette résistance, telle que le fil la possède avant d'avoir été chauffé, ou à cette résistance telle qu'elle existe, quand le fil a atteint la température que lui imprime le pas-

[1] M. Robinson s'est servi des coefficients de dilatation donnés par Dulong et Petit, mais il n'a pas pu faire usage de celui qu'ils ont donné pour le fer, ce métal étant trop oxydable pour que sa dilatation pût être appréciée exactement à de hautes températures.

sage de l'électricité. M. Robinson a résolu la question en enfermant un fil de platine W (fig. 202) dans un premier vase en verre B, placé lui-même dans un second A rempli d'eau ; le fil est mis dans le circuit au moyen des conducteurs C, qui reçoivent les pôles de la pile. Le fil W est d'abord entouré d'air ; le courant qui le traverse le chauffe très-fortement, et sa résistance s'accroît d'autant ; sa chaleur est toute employée à chauffer les enveloppes de verre et l'eau placée entre elles. Dans une expérience, la quantité d'eau étant de 5 ½ pouces cubes, un courant, d'une force égale à 3,527, éleva la température de l'eau de 72° à 77°, 5 F. en étant transmis pendant 12 minutes ; la résistance du fil était équivalente à 257,6 du rhéostat ; le fil était rouge-blanc, et sa température devait être de 1500° environ. Après avoir laissé refroidir l'appareil, on fit passer une partie de l'eau du vase extérieur dans l'intérieur, de manière à le remplir complétement. On transmit alors le courant, qu'on amena à la force de 3,558, à peu près la même qu'auparavant, en mettant dans le circuit une résistance additionnelle de 165°,6 du rhéostat. La température s'éleva seulement de 2°,97 au lieu de 5°,5, et l'augmentation de résistance du fil ne fut que de 89°,0 du rhéostat, au lieu de 257,6. Si, dans ce dernier cas, on opère toujours avec le même courant, mais sans introduire de résistance additionnelle dans son circuit, sa force est alors de 6,045 ; le thermomètre s'élève à 83°,2 F, et l'augmentation de résistance est égale à 94°,5 du rhéostat. La force du courant, qui a presque doublé, compense ici, et au delà, l'effet de la diminution de résistance, tandis que dans le second cas, le courant ayant conservé la même intensité que dans le premier, l'échauffement est cependant beaucoup moindre, parce que la résistance n'est pas si grande, le fil étant empêché, par l'eau dans laquelle il est plongé, d'acquérir la haute température qu'il avait dans la première expérience. Il résulte donc de là que la véritable loi du réchauffement du fil métallique par un courant est, que la chaleur dégagée est proportionnelle au carré de l'intensité du

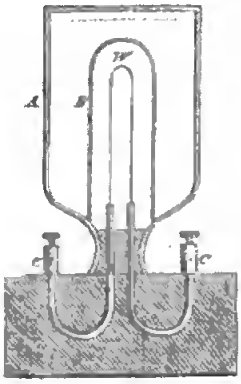


Fig. 202.

courant, et à la résistance actuelle du fil (c'est-à-dire celle qui résulte de son réchauffement).

Les recherches de M. Robinson nous montrent que, quand on réchauffe un fil métallique par un courant voltaïque, sa résistance au passage de ce courant augmente graduellement jusqu'à la fusion du fil, et que cette augmentation est assez exactement proportionnelle à celle de la température. Il est donc important, dans les recherches où l'on tient à avoir des mesures exactes des courants au moyen du rhéostat, de tenir compte de cette cause dans la variation de la résistance.

Remarquons encore qu'il est peut-être difficile d'expliquer la grande augmentation de résistance dont nous avons donné la valeur numérique, uniquement par l'effet du petit accroissement de la distance des particules, qui résulte de l'élévation de la température. M. Robinson trouve la cause peu en rapport avec l'effet ; il préfère attribuer le phénomène à l'action directe de la chaleur. Cependant, la grande élévation de température qu'éprouvent les fils produisant chez eux une dilatation proportionnellement toujours plus considérable à mesure qu'ils se réchauffent davantage, il ne serait pas étonnant que l'augmentation de distance de leurs particules qui en résulte, jointe aux modifications qu'en éprouve la propagation même du courant, fussent suffisantes pour rendre compte de l'accroissement de leur résistance, sans être obligé de recourir à une intervention directe de la chaleur, c'est ce que nous verrons au § 8.

Le réchauffement que le fil éprouve par l'effet du courant qui le traverse, en augmentant la résistance qu'il oppose au passage de ce courant, doit donc en diminuer l'intensité en même temps qu'il en favorise l'effet calorifique ; double résultat dont l'un est inverse de l'autre, ce qui finit par déterminer un état d'équilibre entre eux. Mais si l'on refroidit par une cause extérieure une partie d'un fil rougi par le courant, aussitôt l'autre portion devient beaucoup plus incandescente, et peut même fondre ou brûler, parce qu'en diminuant par le refroidissement la résistance d'une partie du circuit, on augmente l'intensité totale du courant qui le traverse. C'est ce que Davy avait le premier observé en donnant à son expérience une forme assez piquante,

qui consistait à placer un morceau de glace sur une portion d'un fil de platine rougi par le courant, ce qui augmentait considérablement et immédiatement l'incandescence du reste du fil. De même lorsque ce fil était rougi par le courant dans toute sa longueur, il suffisait d'en chauffer par une lampe une partie au rouge blanc, pour que le reste devînt froid.

Cette influence des causes de refroidissement extérieur sur le phénomène d'incandescence des fils donne lieu, dans quelques cas, à des effets assez bizarres en apparence, mais qui rentrent cependant dans les lois générales que nous avons exposées. Ainsi, il est bien connu qu'un fil de platine rougit beaucoup plus facilement, et sur une beaucoup plus grande longueur, dans le vide que dans l'air, ce qu'il est facile de vérifier au moyen de l'appareil de la fig. 203, qui consiste dans un tube terminé à

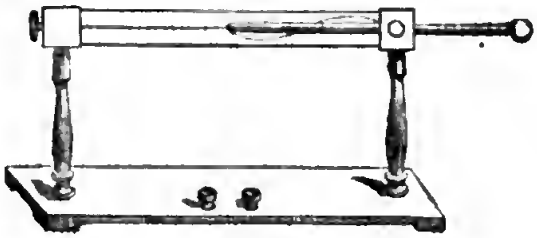


Fig. 203.

un bout par une pince en laiton, à laquelle on fixe l'une des extrémités du fil, et à l'autre par une boîte en cuir dans laquelle passe une tige métallique qui glisse le long du fil, de manière à en mettre une portion plus ou moins longue dans le circuit. La pince et la tige communiquent extérieurement chacune avec l'un des pôles d'une pile. A mesure que l'on raréfie l'air dans le tube et qu'on s'approche du vide, on voit qu'on peut faire rougir une plus grande longueur du fil.

Mais si, au lieu d'avoir un seul fil, on en a deux successifs, parfaitement semblables quant aux dimensions et à la nature, séparés l'un de l'autre par un gros conducteur, alors l'influence refroidissante du milieu ambiant produit des effets singulièrement complexes, que M. Grove a signalés le premier et a étudiés avec soin. L'appareil dont s'est servi le savant physicien anglais consiste (fig. 204) dans deux tubes en verre de 7 à 8 millimètres

de diamètre et de 4 centimètres environ de longueur, fermés par des bouchons traversés par de petites tiges de cuivre auxquelles aboutissent des fils fins de platine tournés en hélice de $0^{mm},3$ de diamètre, et d'une longueur de 10 centimètres environ quand

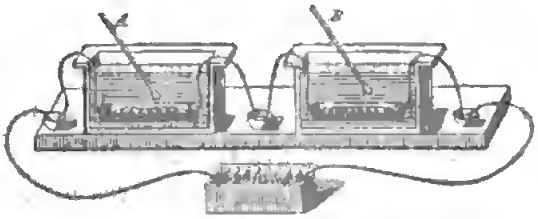


Fig. 204.

ils sont déroulés ; l'un des tubes est rempli d'oxygène, l'autre d'hydrogène, et ils sont plongés dans deux vases distincts semblables, contenant chacun environ 100 grammes d'eau. Un thermomètre est placé dans chaque vase, et les fils sont réunis de manière à former un circuit continu. Un courant produit par une pile de huit couples de Grove, ayant huit pouces carrés de surface chacun, les traverse successivement, et on voit le fil de platine placé dans le tube qui contient l'oxygène devenir rouge-blanc, tandis que celui qui est dans le tube à hydrogène ne s'échauffe pas d'une manière visible. Jusqu'ici le phénomène ne paraît pas extraordinaire, puisqu'on sait que l'influence refroidissante de l'hydrogène est comparativement bien plus grande que celle des autres gaz. Mais ce qui est singulier, c'est que la température de l'eau s'élève très-inégalement dans les deux vases. Ainsi, dans une expérience, elle s'éleva, dans le vase où était le tube à hydrogène, de 15°,5 à 21, et dans celui où était le tube rempli d'oxygène, de 15°,5 à 27°, 2, c'est-à-dire d'un nombre double de degrés. On obtient des différences analogues, mais moins considérables, avec d'autres gaz. Voici le nombre de degrés dont l'eau se réchauffe en entourant le fil de platine successivement de différents gaz, et en l'associant chaque fois avec un fil de platine semblable entouré d'hydrogène :

Hydrogène..	5° 5
Hydrogène sulfuré.	6°

Gaz oléfiant.	9° 2
Acide carbonique.	11°
Oxyde de carbone.	11°
Oxygène.	11° 7
Azote.	12°

Il résulte de ce tableau que le tube dans lequel est le gaz dont le pouvoir refroidissant est le plus considérable, l'hydrogène, est celui qui réchauffe le moins l'eau dont il est entouré. Ainsi, non-seulement le fil de platine ne peut y conserver une température aussi élevée que dans les autres gaz, ce qui n'est pas étonnant, puisqu'il est entouré d'un milieu doué d'un plus grand pouvoir refroidissant, mais de plus il reçoit du courant une chaleur moindre, ainsi que le prouve la température de l'eau qui absorbe toute cette chaleur dans chaque cas.

D'où vient ce dernier effet ? Serait-ce de ce que les gaz exercent un pouvoir conducteur propre, mais différent pour chacun, qui ferait qu'une proportion plus ou moins grande du courant les traverserait au lieu de passer en entier par le fil ? Mais l'étude que nous avons faite, dans le chapitre précédent, de la conductibilité électrique des gaz, ne nous permet pas d'adopter cette explication.

C'est à Clausius qu'on doit d'avoir trouvé la véritable cause de cette anomalie, qui est due à ce que le fil, en se refroidissant, devient meilleur conducteur ; dès lors le courant, rencontrant, en le traversant, une résistance moins grande, y développe moins de chaleur. Ainsi, l'hydrogène, dans les expériences de Grove, joue le même rôle que la glace dans celle de Davy : il refroidit le fil de platine plus que ne le fait un autre gaz ; il le rend, par là, plus conducteur, par conséquent moins susceptible d'être échauffé par le courant, tandis qu'en même temps il facilite la transmission de ce courant, et, en augmentant ainsi son intensité, contribue au réchauffement plus considérable du fil placé dans l'autre gaz.

Il résulte de là que plus un gaz exerce un pouvoir refroidissant considérable, plus il devra rendre le fil de platine conducteur, en même temps qu'il diminuera l'élévation de la température que détermine chez lui le passage du courant. C'est ce

que Grove lui-même avait trouvé en plaçant dans le circuit voltaïque, avec un voltamètre chimique, le fil de platine entouré successivement de chacun des gaz. Voici le tableau des résultats :

GAZ ENTOURANT LE FIL.	QUANTITÉ DE GAZ, DÉGAGÉS PAR MINUTE.
Hydrogène.	138.6
Gaz oléfiant.	126
Oxyde de carbone.	118.8
Acide carbonique.	118.8
Oxygène.	117.0
Azote.	115.0

L'ordre des gaz, dans ce tableau, est parfaitement le même que celui du tableau où se trouve le pouvoir refroidissant de chaque gaz sur le fil de platine.

Les lois qui régissent le dégagement de la chaleur par le passage du courant à travers les fils métalliques s'appliquent également au cas des conducteurs liquides, ainsi que M. E. Becquerel l'a démontré en se servant successivement de deux dissolutions, l'une de sulfate de cuivre, l'autre de sulfate de zinc[1]. Il avait soin de prendre pour électrodes, dans le premier cas, des fils de cuivre, dans le second, des fils de zinc, afin d'éviter les changements chimiques dans le liquide pendant la durée de l'expérience. Un thermomètre, plongé dans le liquide, indiquait sa température, et un voltamètre chimique, placé dans le circuit, mesurait l'intensité du courant. Toutes les précautions étaient prises, comme avec les fils, pour tenir compte du refroidissement du liquide qui était renfermé dans un creuset de platine. Voici, pour chaque dissolution, les quotients qu'on obtient en divisant le nombre qui représente la quantité de chaleur dégagée dans chaque expérience par le carré du nombre qui représente l'intensité correspondante du courant :

[1] Chaque dissolution renfermait, sur 20 grammes d'eau, 4 grammes de sulfate.

EXPÉRIENCES.	SULFATE DE CUIVRE.	SULFATE DE ZINC.
1re expérience.	0.2158	0.4280
2e expérience.	0.2205	0.3025
3e expérience.	0.2032	0.3190
4e expérience.		0.4123
Moyennes.	0.2132	0.3654

L'égalité assez sensible de ces quotients dans chaque série d'expériences, malgré quelques écarts tenant aux difficultés de l'expérience, surtout sensibles avec le sulfate de zinc, montre bien que *pour un même liquide, la quantité de chaleur est proportionnelle au carré de l'intensité du courant.*

En comparant la résistance électrique des deux dissolutions à celle d'un fil de platine pris pour étalon, on trouve ce rapport égal à 0,0261 pour la dissolution de sulfate de cuivre, et à 0,0320 pour celle de sulfate de zinc. Mais, d'après les expériences, le fil étalon a une conductibilité telle que, pour un courant capable de donner 1 centimètre cube de gaz par minute, la quantité de chaleur dégagée serait 10,027. Donc, si la loi de la proportionnalité de la chaleur dégagée à la résistance est vraie pour les liquides comme pour les solides, on trouvera cette quantité égale, pour le sulfate de cuivre, à $10,027 \times 0,0261 = 0,26$; pour le sulfate de zinc, à $10,027 \times 0,032 = 0,32$. Par expérience on a trouvé 0,21 et 0,36.

Les différences passablement fortes qui se manifestent ici entre les résultats du calcul et ceux de l'expérience peuvent tenir aux effets chimiques qui se passent nécessairement à la surface des électrodes, quand même on a choisi ceux-ci de manière à annuler ces effets autant que possible. Aussi, quand il s'agit de liquides qui éprouvent une altération chimique réelle par l'effet de la décomposition, il faut nécessairement tenir compte de ces effets, car cette décomposition s'opère toujours en absorbant la chaleur nécessaire au nouvel équilibre molé-

culaire, chaleur constamment moindre que celle qui est dégagée par l'effet de la résistance du corps au passage de l'électricité, laquelle se trouve ainsi diminuée de la première, que nous chercherons à évaluer dans le chapitre suivant.

Ce n'est pas seulement dans le conducteur liquide interposé entre les pôles de la pile, mais aussi dans celui où plongent les couples, qu'on peut vérifier l'exactitude des lois que nous venons de rappeler. M. Joule a prouvé en effet que *la chaleur développée dans un temps donné dans chaque couple, par l'action voltaïque seule, est proportionnelle à la résistance de conductibilité de ce couple multipliée par le carré de l'intensité du courant électrique.* Il résulte donc de cette loi combinée avec les précédentes le principe général, que la chaleur qui se développe dans une partie *quelconque* du circuit est proportionnelle au carré de la force du courant multiplié par la résistance de cette partie du circuit. Si la loi est exacte pour une partie du circuit, elle doit, suivant la remarque très-juste de M. Poggendorff, s'appliquer au circuit tout entier, la pile comprise. C'est là la plus grande des différences que nous avons dit (p. 181) exister entre la pile voltaïque et la batterie électrique, quant à leur action calorifique. M. Joule a déduit également de la loi générale quelques conséquences, qu'il a vérifiées par l'expérience, sur les rapports qui existent entre la chaleur dégagée par le circuit entier et les actions chimiques qui ont lieu dans le circuit, soit extérieurement aux couples, soit dans les couples eux-mêmes. L'exposition de ces recherches ne peut être faite convenablement qu'après avoir achevé l'étude des effets chimiques du courant.

Je dois cependant, avant de terminer ce paragraphe, faire encore mention d'un principe important que j'ai fait connaître en 1843, et qu'a confirmé récemment M. Favre au moyen d'expériences plus directes. Ce principe consiste en ce que la somme des quantités de chaleur dégagées par un courant donné, dans le conducteur métallique qui réunit les pôles d'un couple et dans le couple lui-même, est constante; seulement, suivant la grosseur du fil qui sert de conducteur, c'est tantôt l'une, tantôt l'autre de ces deux quantités qui est la plus considérable. Une

manière très-simple de faire l'expérience est d'employer un couple platine et zinc distillé ou cadmium, avec de l'acide nitrique très-pur et très-concentré pour liquide, et d'unir les deux métaux par un fil de platine plus ou moins gros, qu'on plonge en entier dans une capsule semblable à celle où est le couple, et remplie de la même quantité d'acide nitrique. On observe avec soin, avec deux thermomètres très-sensibles, les élévations de température de l'acide dans chacune des deux capsules, et on trouve que leur somme, au bout du même temps, est toujours constante, l'une étant tantôt plus, tantôt moins considérable que l'autre. On peut également plonger le fil de platine qui unit les deux métaux du couple dans le même liquide que le couple lui-même, et on voit que, pour le même temps, l'élévation de température de ce liquide est toujours la même, quelle que soit la grosseur du fil de platine. Dans les deux modes d'opérer, il faut souder au platine et au zinc, ou cadmium, du couple, une tige en platine assez grosse pour qu'elle ne s'échauffe pas; c'est au moyen de ces deux tiges qu'on met dans le circuit le fil de platine de dimensions variables.

M. Favre a employé un calorimètre semblable à celui qui a servi aux belles expériences qu'il a faites en commun avec M. Silbermann sur la chaleur dégagée dans les diverses actions chimiques, pour confirmer et étendre le principe que je viens d'exposer. Il s'est servi également d'un seul couple zinc platine et eau acidulée d'un vingtième d'acide sulfurique, et il a interposé successivement dans le circuit des fils de platine de longueur variable et de diamètres différents. Il a toujours trouvé, pour 33 grammes de zinc dissous, une quantité totale de chaleur développée égale à 18137 unités de chaleur, mais répartie différemment entre le couple et le fil de platine, suivant les dimensions de ce dernier. Or, cette quantité de chaleur est précisément celle que dégage la dissolution même des 33 grammes de zinc dans l'eau acidulée par l'effet des différentes actions chimiques qui s'y passent, soit que le sulfate de zinc soit formé par une transmission d'électricité à travers un gros fil qui n'offre aucune résistance au courant, soit qu'il soit formé directement sans électricité transmise; dans ce dernier cas, la

quantité de chaleur était de 18444 au lieu de 18137, ce qui ne tient évidemment qu'à quelques erreurs d'expériences. M. Favre conclut de là que la chaleur développée par la résistance au passage de l'électricité dans les conducteurs de la pile est un simple emprunt fait à la chaleur totale produite par les actions chimiques qui ont lieu dans le ou les couples, et qu'elle est rigoureusement complémentaire de celle qui y reste confinée, de manière à former une somme égale à la chaleur totale correspondante uniquement aux réactions chimiques, indépendamment de toute électricité transmise.

Il résulterait de la loi de M. Favre, que de même que toutes les actions chimiques ne produisent pas la même quantité de chaleur, de même aussi la même quantité d'électricité dynamique pourrait aussi produire des effets calorifiques très-différents, suivant la nature de l'action chimique qui lui aurait donné naissance. C'est ce que M. Botto avait déjà démontré dans des recherches où il cherchait à comparer entre elles les quantités de chaleur dégagées par l'électricité provenant de couples de différente nature. Nous reviendrons sur ce sujet, et sur les divers travaux auxquels il a donné naissance, quand nous nous occuperons de la production de l'électricité par les actions chimiques. Nous nous contenterons pour le moment de remarquer que cet élément très-important du courant voltaïque, savoir, la nature de l'action qui lui donne naissance, ou, ce qui revient au même, la nature de la force électromotrice, joue dans la production des effets calorifiques un rôle analogue à celui de la densité de l'électricité, dans le dégagement de chaleur opéré par les décharges électriques. Cette remarque très-juste de Riess nous fait voir qu'il faut, de même qu'on distingue dans les décharges la densité de la quantité, distinguer dans les courants l'*intensité* qui correspondrait à la densité, de la quantité; c'est ce que nous démontrera également l'étude des effets chimiques de l'électricité.

§ 5. Incandescence et fusion des métaux par l'électricité dynamique, et effets moléculaires qui les accompagnent.

Nous nous sommes borné, dans les deux paragraphes pré-

cédents, à rechercher les lois qui régissent le simple réchauffement des fils par l'électricité dynamique, sans nous occuper des changements, soit permanents, soit passagers dans leur apparence, qui accompagnent ce réchauffement quand l'électricité dépasse une certaine limite d'intensité. Nous avons déjà fait mention de ces effets, soit dans le § 2 du présent chapitre, soit dans le § 4 du précédent. Ils consistent essentiellement dans l'incandescence, la fusion, la vaporisation, ainsi que dans l'inflexion, la rupture et autres modifications moléculaires qu'éprouvent les fils par le passage de décharges électriques relativement plus fortes que celles qui produisent le simple réchauffement. Les faits de cet ordre sont, en effet, essentiellement produits par les décharges plutôt que par les courants électriques, étant le résultat d'une action brusque et très-intense, plutôt que d'une action modérée, mais continue; cependant de forts courants peuvent, dans certains cas, les manifester. C'est à Riess que nous empruntons la plupart des détails que nous donnerons dans l'étude que nous allons en faire.

Le premier effet mécanique qu'éprouve un fil de métal mince, traversé par la décharge, consiste dans un ébranlement sensible et dans la formation d'une espèce de vapeur grise, épaisse, composée de parcelles métalliques détachées de sa surface. Il se manifeste en même temps des étincelles aux points d'attache du fil avec les conducteurs destinés à le mettre dans l'arc de clôture de la batterie; ces étincelles proviennent de parcelles métalliques un peu plus grandes que les premières qui sont arrachées des points d'attache, et jaillissent en devenant incandescentes. L'ébranlement est d'autant plus sensible que le fil est plus mobile, et quant aux étincelles, elles sont plus brillantes avec le platine, le palladium qu'avec l'argent et le laiton, et il n'y en a pas avec le cuivre. Le scintillement même des étincelles dépend à la fois de la ténacité du métal et de son degré d'oxydabilité; aussi il n'y en a point avec l'argent, tandis qu'avec le fer il est très-fort. La formation du nuage de vapeurs est un phénomène beaucoup plus constant; mais son intensité varie, non-seulement d'un fil à l'autre, mais aussi dans un même fil avec l'état de sa surface. Ainsi, un fil de platine qui a été bien poli, dressé

avec soin et hermétiquement serré à ses points d'attache, exige une décharge plus forte qu'un autre semblable, mais qui n'est pas dans les mêmes conditions, pour manifester les phénomènes que nous venons de signaler. En augmentant graduellement la force de la décharge, on observe une altération dans l'état physique du fil, qui devient persistante ; c'est une inflexion qui ne se manifeste d'abord que comme une diminution de poli en un point de la surface, et qui finit par devenir de plus en plus sensible, et par se transformer en un angle très-appréciable, avec des côtés longs de plusieurs millimètres. Cet angle est en général très-obtus, de 110° le plus souvent. Il se manifeste également dans des fils de platine, de fer et de cuivre, même lorsqu'ils ont des diamètres considérables. Sa formation est plus difficile quand le fil est fortement tendu ; il est alors souvent remplacé par une simple légère entaille ou par un déchirement du fil lui-même qui a lieu là où l'inflexion se serait formée si le fil avait pu céder. L'apparence onduleuse que présentent les fils, quand ils ont été mis plusieurs fois de suite en incandescence par des décharges répétées, tient à la formation de plusieurs de ces angles qui se modifient ainsi les uns les autres.

C'est évidemment à ces inflexions qu'est dû le raccourcissement des fils qui ont subi un grand nombre de décharges, et que Nairne et Van Marum avaient déjà signalé, le premier ayant réussi, au moyen de 15 fortes décharges successives, à raccourcir de 2 centimètres un fil de fer long de 27 centimètres et épais de $0^{mm},3$; le second ayant, par une seule décharge, raccourci de 8 millimètres un fil de fer long de 65 centimètres. Riess a montré, en effet, qu'un fil de platine de 174 millimètres de longueur qui avait subi un raccourcissement de 12 millimètres environ, par l'effet des décharges, revient, à 2 millimètres près, à sa longueur primitive, en étant simplement étiré entre les doigts ; il s'est assuré que ce raccourcissement apparent est toujours dû à des inflexions qui, dans certains cas, échappent à une observation superficielle.

M. E. Becquerel avait également observé que, soit dans l'air, soit dans le vide, des fils de platine et d'argent, d'un très-petit diamètre, se raccourcissent et deviennent ondulés sous l'action

d'une ou de plusieurs décharges, et que cet effet s'accroît avec le nombre des décharges.

L'incandescence des fils est soumise aux mêmes lois que le simple réchauffement ; c'est ce que Riess a démontré en plaçant dans l'arc de clôture un thermomètre électrique muni d'un fil assez fort pour ne pas subir d'altération mécanique, mais éprouver un simple réchauffement par l'effet de la décharge dont il sert à mesurer l'intensité. Ainsi, en cherchant à déterminer la quantité d'électricité et le nombre de bouteilles nécessaires pour amener un fil de platine d'une dimension donnée, à un état d'incandescence visible de jour, on trouve que, pour que le réchauffement indiqué par le thermomètre électrique et l'incandescence demeurent les mêmes, il faut que le produit de la quantité d'électricité par sa densité soit constant. Dans les expériences faites par Riess, ce produit $\frac{q^2}{s}$ était en moyenne 31, q étant la quantité d'électricité et $\frac{q}{s}$ sa densité ; il en résulte que, connaissant ce produit 31, on peut déterminer pour un nombre quelconque s de bouteilles la quantité d'électricité q nécessaire pour rendre incandescent le même fil de platine. Il faut, en effet, avoir $\frac{q^2}{s} = 31$ ou $q = \sqrt{31\,s}$.

Voici un tableau des résultats comparatifs du calcul et de l'observation tels que Riess les a obtenus :

Nombre de bouteilles.	2	3	4	5	7
Valeur calculée de q	7.9	9.6	11	12.4	14.7
Valeur observée de q	8	10	11	12	14

Il est remarquable que les valeurs observées s'accordent aussi bien avec les valeurs calculées dans l'appréciation d'un phénomène où la sensibilité de l'œil joue un rôle aussi important.

La force de la décharge nécessaire pour produire l'incandescence est, comme pour le simple réchauffement, indépendante de la longueur du fil et proportionnelle à la quatrième puissance de son rayon. Pour démontrer l'exactitude de la première loi,

on prend d'abord un fil de platine de 35 millimètres de longueur, et on trouve que pour le rendre incandescent, il faut une décharge déterminant dans le thermomètre électrique un réchauffement égal à 8, produite elle-même par quatre bouteilles, avec une quantité d'électricité $q=12$, ou par sept bouteilles avec $q=15$, ce qui revient au même, d'après la loi précédente. Avec un fil cinq fois plus long, c'est-à-dire de 75 millimètres, il faut, il est vrai, avec quatre bouteilles, une quantité d'électricité $q=22$, mais produisant sur le thermomètre le même réchauffement 8, ce qui prouve que la force de la décharge est restée la même.

La seconde loi résulte d'expériences faites avec cinq fils de diamètres différents placés successivement avec le thermomètre électrique dans le même arc de clôture. En calculant d'après la loi quelle doit être la force de la décharge, ou, ce qui revient au même, la température indiquée par le thermomètre électrique pour produire l'incandescence de chacun des cinq fils, et en comparant le résultat du calcul à celui de l'observation, on trouve le tableau suivant :

RAYON DU FIL.	TEMPÉRATURE DU THERMOMÈTRE ÉLECTRIQUE	
	OBSERVÉE.	CALCULÉE.
0mm.040	1.2	1.3
0 .047	2.7	2.3
0 .059	5.8	5.6
0 .065	8.1	8.0
0 .090	31.0	32.4

Quand il s'agit de comparer les charges électriques nécessaires pour produire l'incandescence de divers métaux, l'expérience est bien plus difficile, parce que la couleur du métal, sa facilité plus ou moins grande à s'oxyder, rendent l'observation incertaine. Cependant Riess est parvenu, par la même méthode que ci-dessus, à déterminer pour des fils de même diamètre, mais de nature différente, la force de la décharge nécessaire pour

les rendre incandescents. Voici les résultats qu'il a obtenus avec les métaux du commerce, et par conséquent dont la pureté chimique ne peut être garantie :

Fer.	0.816
Argentane.	0.950
Platine.	1. 00
Palladium.	1. 07
Laiton.	2. 59
Argent.	4. 98
Cuivre.	5. 95

On voit bien que pour produire la même incandescence dans chaque fil, la force de la décharge doit être d'autant plus grande, que la résistance au passage de l'électricité est moindre; résultat semblable à celui que nous avions obtenu pour le réchauffement, et qui avait été constaté depuis longtemps, comme nous l'avons remarqué, par un grand nombre de physiciens, tant pour l'incandescence produite par les décharges, que pour celle que détermine le courant électrique. Mais indépendamment de cette cause, la chaleur spécifique du métal et sa densité doivent exercer une influence qu'on pourrait apprécier exactement, si l'on pouvait être certain que l'incandescence commence, pour les différents métaux, à la même température. Dans ce cas, en effet, on devrait obtenir le même quotient en divisant le produit formé de la force de la décharge nécessaire à chaque métal pour devenir incandescent multiplié par sa résistance électrique, par le produit de sa chaleur spécifique et de sa densité; et c'est ce qui n'a pas lieu. Cela tient à ce que d'autres circonstances exercent une influence sur l'incandescence, telle, en particulier, que la facilité plus ou moins grande avec laquelle les métaux absorbent l'oxygène de l'air. On ne peut donc attacher une grande importance théorique aux résultats consignés dans le tableau ci-dessus.

Il nous reste à étudier les phénomènes de déchirement, de fusion et de pulvérisation, qui suivent une incandescence provoquée par une charge trop forte pour que le fil puisse demeurer intact ou ne subir que de simples inflexions; ce sont des effets en partie calorifiques, en partie mécaniques, qu'il est important

de bien analyser pour se faire une idée exacte de cet ordre de phénomènes.

Quand on augmente graduellement la quantité d'électricité nécessaire pour produire la simple incandescence du fil, on obtient d'abord une incandescence très-vive, puis le fil devient très-blanc, et enfin il se rompt en deux ou plusieurs fragments; l'aspect de ces fragments montre que c'est plutôt une déchirure qu'une fusion qui s'opère. La différence entre l'intensité de la décharge qui produit simplement l'incandescence et celle de la décharge qui produit la déchirure varie avec la nature des métaux; elle est grande avec le platine et le palladium, plus petite avec le cuivre, l'argent et le fer, et très-faible pour le laiton. Elle est beaucoup moindre pour un métal qui a déjà subi la décharge que pour celui qui la subit pour la première fois. Pour examiner l'état des fragments, il faut placer le fil dans un tube de verre; on voit quelquefois les fragments se souder les uns aux autres, mais ils ne présentent aucune trace de fusion à leurs extrémités, qui sont appointies comme si le fil avait été rompu par une force qui l'aurait tiré dans le sens de sa longueur. Pour éviter ces fusions superficielles, il faut employer une décharge plus forte. Ainsi, dans une cloche de verre, haute de 19 centimètres et large de 15, une batterie de 5 bouteilles rendait un fil de platine de 43 millimètres de longueur et de 0,058 de rayon, incandescent avec une quantité d'électricité égale à 12, et le brisait en plusieurs fragments avec une quantité égale à 17, tandis qu'un fil de cuivre, dans les mêmes conditions, exigeait 23 d'électricité pour devenir incandescent, et 27 pour être déchiré. Les métaux qui entrent facilement en fusion, tels que des fils d'étain et de cadmium, sont déchirés sans passer par l'incandescence.

Si l'on dépasse la force de la décharge qui déchire le fil, on parvient à le fondre, tout en le brisant en même temps en un grand nombre de fragments. Ainsi un fil de platine semblable à celui qui avait été déchiré par la quantité d'électricité égale à 17 fut brisé et fondu en partie avec une quantité égale à 20. Des fils d'argent et d'étain éprouvaient le même effet. Mais pour avoir une fusion complète, il faut des décharges plus fortes. Le

fil de métal est réduit alors à de petites boules parfaitement rondes; c'est ce qu'on observe facilement avec des fils de platine et d'argent; pour un fil de cuivre, long de 36 millimètres et de 0,056 de rayon, une batterie de six bouteilles le met en incandescence avec une quantité d'électricité égale à 25, et le divise, avec une quantité égale seulement à 30, en un nombre infini de petites boules à peine perceptibles. La différence entre les deux quantités d'électricité est bien petite; cela tient probablement à ce qu'avec les métaux facilement oxydables, la température est augmentée par la présence de l'oxygène de l'air; il s'ajoute ainsi un réchauffement chimique au réchauffement électrique. Cet effet est surtout sensible avec le fer, qui fond souvent sous l'influence de décharges qui n'eussent dû produire qu'un réchauffement modéré. L'incandescence dans ce cas ne cesse pas immédiatement après que la décharge a eu lieu, comme cela arrive ordinairement, mais le fil parvient à l'incandescence blanche et se fond en gouttes qui rejaillissent en étincelant.

La fusion est donc un phénomène assez complexe; aussi est-il impossible d'établir pour chaque espèce de métal la force de la décharge nécessaire pour le fondre, d'autant mieux que, ainsi que Van Marum l'a observé, toute l'électricité de la batterie n'est pas employée à opérer la fusion, et qu'il reste un résidu dans la batterie même qui est quelquefois assez considérable. Cet effet, que Riess a étudié avec soin, tient à ce que l'électricité produit la désorganisation du fil en un instant trop court pour avoir le temps de passer en entier. Il est assez curieux que le résidu, lors de la réduction d'un fil en fragments, soit 0,23 de la totalité d'électricité qui était dans la batterie, tandis qu'elle n'est que 0,15, c'est-à-dire moins considérable lors de la simple décharge explosive à travers l'air.

Nous avons vu que le premier effet de la décharge sur un fil est la formation d'un petit nuage de vapeurs qui provient des particules détachées de la surface. Avec une décharge suffisamment forte, on peut réduire toute la masse même du fil en une semblable vapeur. Un fil de platine soumis à la décharge de 5 bouteilles devint incandescent avec $q=13$, fondit en pe-

tits globules avec $q=17$, et il disparut avec une lumière éclatante en laissant le tube dans lequel il était renfermé revêtu d'une couche grise qu'on pouvait facilement enlever. Dans l'air libre, la vapeur recueillie sur une lame de cuivre présentait des taches grises et noirâtres qui semblaient formées de fragments métalliques de formes et de grandeurs diverses, et qui ne présentaient pas de traces de fusion. La pulvérisation est donc très-distincte de la fusion, et ce qui le prouve, c'est que l'étain, qui a besoin pour être fondu d'une charge moindre que le cadmium, en exige une plus forte pour être pulvérisé. En général, à l'air libre, le métal pulvérisé est oxydé en même temps; on peut en recueillir des traces très-visibles en plaçant sur une feuille de papier blanc le fil qu'on pulvérise, et si on veut obtenir les traces du métal lui-même et non de son oxyde, on n'a qu'à le pulvériser dans une cloche où il y ait de l'azote ou de l'air très-raréfié. Il faut avoir soin, dans ces expériences, de bien tendre les fils en les plaçant entre deux feuilles de papier.

En résumé, si l'on suit la série des effets que produisent des décharges d'une intensité croissante, on trouve que le fil commence par se réchauffer, qu'il éprouve un ébranlement, puis des inflexions, qu'il devient incandescent, qu'il est arraché des pinces auxquelles il était fixé, qu'il est rompu en fragments, fondu et enfin pulvérisé. Les effets calorifiques et mécaniques se trouvent ainsi entremêlés de manière non-seulement à se succéder alternativement, mais aussi à se trouver simultanés dans bien des cas. Ainsi l'incandescence d'un fil n'a jamais lieu sans qu'il n'y ait en même temps des inflexions, et il est rare qu'on obtienne une fusion sans qu'il n'y ait en même temps une rupture du fil en fragments. La pulvérisation est également toujours accompagnée d'une grande élévation de température, ainsi que le prouve l'oxydation des poussières métalliques. Cette association des deux genres d'effets conduit à présumer qu'ils sont liés par une dépendance mutuelle. Et, en effet, il est facile de s'assurer que l'incandescence et la fusion ne sont pas un simple effet du dégagement de chaleur par la décharge suivant les lois établies par l'expérience; car cette chaleur, dont on peut calculer l'intensité en connaissant la force de la dé-

charge, serait loin de suffire pour produire l'incandescence et la fusion. Il y a donc dans la production de ces deux phénomènes un effet direct de l'électricité, indépendamment de l'action indirecte qu'elle exerce en produisant la chaleur. Riess estime que ce double mode d'action tient à ce que la transmission de la décharge s'opère d'une manière toute différente pour produire le réchauffement du fil, de celle dont elle a lieu pour occasionner les effets mécaniques au nombre desquels il faut placer l'incandescence et la fusion. Nous reviendrons plus loin sur le mécanisme même de la décharge, quand nous en aurons étudié les effets calorifiques et lumineux dans son trajet à travers les conducteurs imparfaits.

Ce mécanisme paraît, en certains points, différer de celui du courant voltaïque qui ne posséderait que le mode de transmission propre au développement de la chaleur ; car, avec le courant, les phénomènes d'incandescence et de fusion ne paraissent être qu'une simple conséquence d'une augmentation de réchauffement, et on n'observe pas d'effets mécaniques tels que la rupture et la pulvérisation. Toutefois on peut remarquer dans les fils qui ont éprouvé l'incandescence une altération à leur surface du même genre que celle que nous avons appelée inflexion. Cette altération est même plus profonde, car les fils qui ont été rendus incandescents par le passage d'un fort courant voltaïque deviennent plus cassants et paraissent éprouver une modification dans leur structure moléculaire. C'est ce que j'ai souvent observé avec des fils de platine, preuve que cet effet n'est point dû à une oxydation.

Il existe en outre, dans les effets calorifiques et lumineux produits par les piles à haute tension à travers les conducteurs imparfaits, des phénomènes particuliers qui dénotent également un genre d'action mécanique exercé par les courants, analogue, jusqu'à un certain point, à celui des décharges. Enfin il y aurait à faire, pour les effets d'incandescence des fils métalliques par le courant, une étude analogue à celle qu'a faite Riess pour les décharges, et peut-être trouverait-on des résultats plus variés et des lois plus détaillées que celles que nous avons exposées dans le paragraphe 2, où nous avons traité ce sujet.

§ 6. Effets calorifiques et lumineux des décharges à travers des conducteurs imparfaits.

Après avoir étudié les effets lumineux, et principalement calorifiques de l'électricité dynamique, quand elle est transmise à travers de bons conducteurs, il nous reste à nous occuper de ces mêmes effets quand le conducteur est imparfait. Ce conducteur imparfait peut être solide, liquide ou gazeux, mais c'est plus particulièrement dans les deux derniers cas, et surtout dans le troisième, que se manifeste le phénomène à la fois calorifique et lumineux qui accompagne soit la décharge électrique, soit le passage d'un courant. Nous distinguerons dans l'étude du phénomène le cas où il est produit par la décharge, c'est celui qui va nous occuper, et le cas où il est produit par le courant, auquel nous consacrerons le paragraphe suivant.

On nomme en général *étincelle électrique* l'apparence lumineuse qui accompagne la décharge électrique à travers un conducteur imparfait. Cette apparence se présente sous des formes très-variées, suivant l'état physique et la nature, soit du milieu où elle se manifeste, soit des bons conducteurs, ordinairement métalliques, entre lesquels s'opère la décharge. Dans l'air ordinaire, et avec des conducteurs en forme de boules et en laiton, l'étincelle a la forme d'un trait d'une couleur blanche avec une légère lueur rougeâtre à ses deux extrémités. Si la décharge est forte, l'étincelle est longue, et forme des lignes brisées et légèrement courbes. On peut avec de bonnes machines électriques, et sans le secours de bouteilles de Leyde, avoir des étincelles de 30 à 35 centimètres de longueur, très-blanches et très-brillantes, dans lesquelles la forme de zigzag est très-prononcée. Cette forme tient évidemment à une condensation de l'air qui, s'opérant dans le sens de la direction de la décharge, l'oblige de se dévier latéralement, mais sans modifier en rien son point de départ et son point d'arrivée.

On peut augmenter l'effet lumineux de l'étincelle au moyen des tubes étincelants, qui sont des tubes de verre sur lesquels on colle en spirale de petits losanges en étain, dont les pointes

sont très-rapprochées les unes des autres. A leurs extrémités on fixe des boules de métal qui communiquent avec les losanges les plus rapprochés; on tient à la main une des boules, et en tirant de l'autre des étincelles d'une machine électrique, on voit ces étincelles jaillir en même temps entre toutes les pointes; mais la lumière n'est plus aussi vive, et elle prend une teinte rougeâtre qu'elle doit en partie à la forme, en partie à la nature des petits losanges.

Avant de rechercher les propriétés de l'étincelle, et en particulier ses propriétés lumineuses, nous devons analyser les circonstances qui influent sur sa forme et en général sur son apparence. Ces circonstances sont avant tout l'intensité de la décharge qui lui donne naissance, puis la forme des conducteurs entre lesquels elle s'échappe et la nature du milieu qu'elle traverse. La nature des conducteurs entre lesquels elle part peut modifier sa couleur, mais non sa forme.

Dans l'air atmosphérique, sous la pression ordinaire, l'étincelle électrique prend souvent la forme d'une aigrette. Cette forme se présente quand l'électricité d'une machine s'écoule par une partie anguleuse de son conducteur (fig. 205), ou qu'elle sort d'un conducteur entouré d'un morceau de drap ou d'un morceau de soie couvert d'une poussière métallique. A son point de sortie, l'étincelle ne présente qu'un trait, mais elle se ramifie bien vite en une foule de petits filets étincelants. Avec une bonne machine électrique, il suffit de fixer sur son conducteur une longue tige métallique de 5 à 10 millimètres de diamètre, terminée par une petite boule de 1 à 2 centimètres de diamètre, pour voir jaillir de la boule une belle aigrette (fig. 206), quand on met la machine en activité. Si l'on fait usage d'une boule plus petite, en ayant toujours la même machine électrique, l'aigrette est plus faible, et le son qui l'accompagne, quoique moins prononcé, est plus continu. Avec des

Fig. 205.

Fig. 206.

boules plus petites ou des conducteurs terminés en pointes fines, les aigrettes diminuent encore, et le son devient à peine perceptible. Quand le son cesse, la lumière change d'apparence et devient continue comme une lueur, au lieu de paraître comme une succession de petits points d'une lumière très-vive.

L'aigrette semble donc, suivant Faraday qui en a fait une étude toute particulière, être le résultat d'une succession de petites décharges entre le conducteur et les particules successives de l'air polarisé par induction. C'est ce qui expliquerait la production du son. Wheatstone a montré en effet, au moyen de son miroir tournant[1], que l'aigrette, quoiqu'elle paraisse continue, consiste en décharges successives et intermittentes. Faraday envisage avec raison ce phénomène comme le résultat de la décharge qui a lieu, à travers l'air, entre l'extrémité du conducteur électrisé et un corps voisin, au besoin les parois de la chambre, électrisé par influence. L'air interposé est polarisé comme doit l'être tout corps diélectrique, et comme les filets d'air convergent vers le point du conducteur d'où part l'aigrette, c'est dans le voisinage de ce point que leur polarité est la plus forte. Aussi, lorsque cette polarité devient assez forte pour que la décharge ait lieu, les filets d'air ne sont lumineux que dans leur partie la plus rapprochée du point de départ de l'aigrette, où ils sont le plus concentrés. Plus loin il y a bien une succession de décharges, mais les filets étant plus divergents, l'intensité est plus faible; il y a seulement décharges obscures sans lumière. L'influence inductrice des corps voi-

[1] Nous avons vu que Wheatstone est parvenu, au moyen de la réflexion produite par un miroir qui tourne autour d'un axe avec une très-grande rapidité, à saisir les plus légères différences de temps entre des apparitions lumineuses qui paraissent simultanées (voyez p. 125). C'est par le même moyen qu'il s'est assuré de l'instantanéité de la lumière de l'étincelle, dont l'image n'est point changée par le mouvement du miroir, tandis que celle de l'aigrette s'allonge dans le sens du mouvement, ce qui prouve que les décharges qui la constituent durent un certain temps appréciable par le mouvement du miroir. En même temps, les étincelles successives dont se compose le faisceau qui est lui-même placé sur le prolongement de l'axe du miroir tournant, étant réfléchies chacune par une partie différente du miroir, se présentent comme arrangées à des distances régulières dans un cercle, preuve de leur discontinuité.

sins est tellement nécessaire à la production du phénomène, que, lorsque la machine électrique est faible, il suffit, pour provoquer l'aigrette, d'approcher la main ou un corps conducteur

Fig. 207.

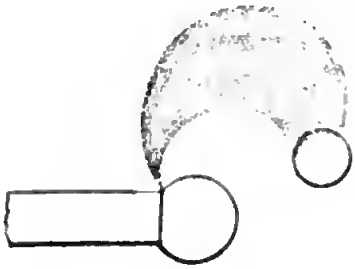


Fig. 208.

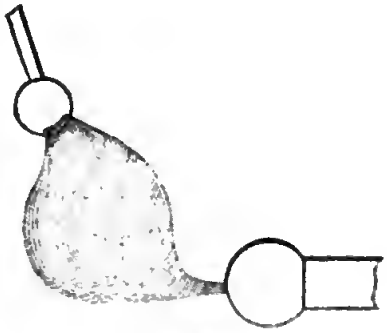


Fig. 209.

pour la déterminer et lui donner une forme et une direction qui varient avec la position de ce conducteur (fig. 207, 208 et 209), de manière à démontrer qu'elle est bien le résultat de la décharge qui s'opère entre les deux conducteurs.

Dans les expériences qui précèdent, l'électricité du conducteur d'où partait l'aigrette était constamment positive; si le conducteur, terminé en pointe, est chargé d'électricité négative, alors on y voit paraître un simple point lumineux, ou plutôt comme une petite étoile lumineuse. Mais cependant on peut obtenir une aigrette avec l'électricité négative en se servant, au lieu d'une pointe, d'une tige conductrice terminée par une forme arrondie. Seulement l'aigrette est beaucoup plus courte (fig 210), et la succession des décharges qui la composent est beaucoup plus rapide (sept à huit fois) que dans le cas de l'électricité positive, ainsi que l'indique le son qui l'accompagne.

Fig. 210.

Une autre différence assez remarquable peut être observée quand on approche de l'aigrette négative l'extrémité arrondie d'un fil métallique qu'on tient à la main; cette extrémité devient positive par induction, et montre déjà, à 20 centimètres de distance, une lueur brillante sans que rien ne soit encore changé à l'aigrette négative; mais à une distance moindre, le son de l'aigrette négative devient plus aigu, ce qui indique une succession plus rapide des petites décharges qui la composent; à une distance encore plus petite une aigrette positive se montre à l'extrémité du conducteur induit, mais en même temps la négative se contracte, et on les voit simultanément l'une et l'autre avec une apparence très-différente (fig. 211). On peut, en employant pour conducteur induit un fil un peu fin, obtenir à une certaine distance deux aigrettes, l'une positive, l'autre négative, parfaitement semblables et donnant des sons à l'unisson.

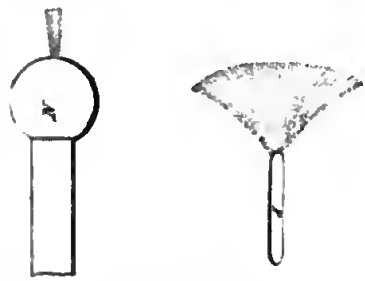


Fig. 211.

En résumé le conducteur négatif se conduit comme un positif dont l'électricité a moins de tension, ce qui est d'accord avec l'observation que nous avons déjà faite dans le premier chapitre de cette quatrième partie[1], que l'électricité négative se décharge dans l'air à une tension plus basse que celle qui est nécessaire pour l'électricité positive. Faraday avait constaté ce fait déjà signalé par Belli et quelques autres physiciens, en opérant, ainsi que nous l'avons dit[2], des décharges entre des boules de différentes dimensions et en étudiant la formation des aigrettes aux boules inductrices et induites, soit positives, soit négatives. Nous verrons plus loin que ce phénomène tient à une différence plus générale qui existe entre les propriétés de l'électricité positive et celles de la négative quand elles sortent l'une et l'autre, pour se neutraliser, d'un conducteur où elles sont accumulées. Mais nous avons à étudier auparavant l'effet de la na-

[1] Tome II, page 106.
[2] Tome II, page 107.

ture du milieu ambiant sur la forme et l'apparence de l'étincelle.

Quand on produit l'étincelle dans un espace où l'air est raréfié, on la voit se diviser, s'affaiblir et prendre une teinte rougeâtre. Dans un tube long de 2 à 3 mètres, et dans lequel on a fait le vide, ou du moins raréfié l'air autant que possible, l'étincelle produit une magnifique lueur rouge violacée qui le remplit tout entier et qui semble circuler intérieurement en forme d'hélice, ce qui tient probablement à l'influence conductrice de la couche d'humidité adhérente au verre. On transmet l'étincelle au travers du tube au moyen de deux viroles métalliques, placées à ses extrémités, et terminées extérieurement, l'une par une boule qui communique avec la machine d'où l'on tire l'étincelle, et l'autre avec un robinet qui permet de faire le vide dans le tube et qu'on fait communiquer avec le sol. On peut également observer les effets lumineux de l'électricité au moyen de l'œuf électrique, qui est un vase de verre de forme ovoïde, à l'une des extrémités duquel est adapté un tube à robinet, et à l'autre une tige à bouton, passant dans une boîte à cuir (fig. 212). On raréfie l'air plus ou moins en vissant le tube sur la platine d'une pompe pneumatique; à mesure que l'air est raréfié, on peut éloigner davantage le bouton de la tige mobile de celui de la tige fixe ajustée au robinet, et l'étincelle en devenant plus longue perd de sa vivacité, prend une couleur rouge violacé et se divise en une multitude de jets elliptiques. C'est une véritable aigrette, dans le genre de celle de la figure 207, très-

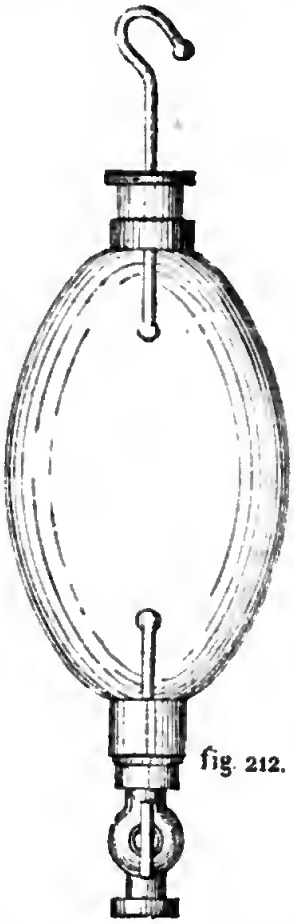


fig. 212.

longue et composée de ramifications très-larges et distantes les unes des autres, quelquefois d'un ou plusieurs centimètres.

Cependant lorsque la décharge est très-forte, telle que celle qui résulte d'une batterie puissante, on obtient dans le vide une lumière aussi vive et aussi brillante que dans l'air. Si la lumière est en général faible et diffuse dans le vide, cela tient à ce que la décharge peut avoir lieu sous une tension beaucoup moins grande que dans l'air, ce qui permet à la machine électrique, avec laquelle on met en communication l'un des boutons de l'œuf électrique, de donner son électricité à mesure qu'elle se développe ; il n'en est plus de même si on accumule cette électricité au moyen d'une batterie, de manière à la transmettre toute à la fois.

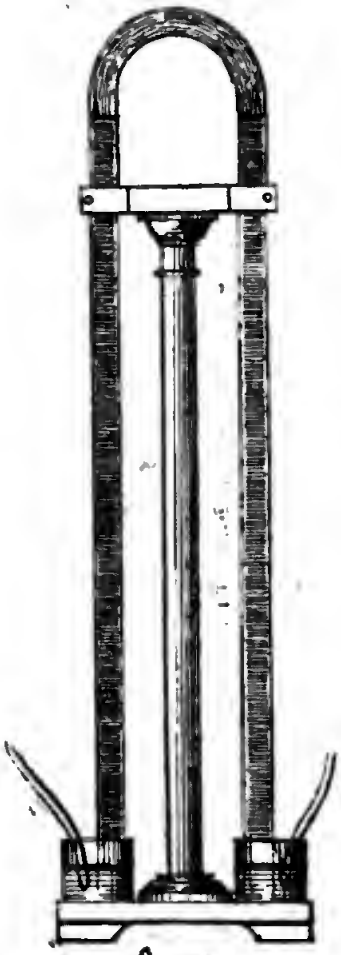


Fig. 212.

Enfin on peut obtenir l'étincelle dans le vide barométrique au moyen d'un tube courbé en forme de syphon et formant un double baromètre (fig. 213); on fait passer l'étincelle électrique d'une cuvette à l'autre en l'obligeant ainsi à traverser les deux colonnes de mercure et l'espace vide qui les sépare. L'étincelle remplit cet espace d'une lumière diffuse violacée, il suffit d'une tension électrique très-faible pour que le phénomène ait lieu.

Davy a fait une étude spéciale de la lumière électrique dans le vide ou plutôt dans des espaces remplis de vapeurs de différentes espèces. Il opérait au moyen d'un tube recourbé ayant

une branche fermée et plus longue que l'autre (fig. 214). Un fil de platine était soudé à l'extrémité de la branche fermée, de manière qu'une partie fût en dehors et l'autre en dedans. La branche fermée était remplie de mercure bien purifié et purgé d'air et de vapeurs aqueuses; puis on faisait le vide dans la branche ouverte qui était munie d'un robinet à son extrémité. On se procurait ainsi au haut de la branche fermée un espace vide d'une plus ou moins grande étendue. L'étincelle d'une machine, et encore mieux celle d'une bouteille de Leyde, traversait cet espace et y déterminait un effet lumineux; mais cet effet était beaucoup augmenté en chauffant le mercure graduellement jusqu'à l'ébullition; la lumière avait alors une couleur verte dont l'éclat était des plus brillants. A mesure que la température s'abaissait, la couleur perdait de sa vivacité, et à 29° F. (—1° $\frac{2}{3}$) la lumière était si faible qu'on ne pouvait l'apercevoir que dans l'obscurité la plus profonde. Une petite quantité d'air introduite dans le vide mercuriel faisait changer la couleur de vert en vert de mer, puis en bleu et en pourpre. En remplaçant le mercure par l'alliage fusible de bismuth et d'étain, on obtenait une lumière jaune et très-pâle; avec de l'huile d'olive pure et du chlorure d'antimoine liquide, dont la température d'ébullition n'est pas très-loin de celle du mercure, Davy obtint une lumière plutôt plus brillante que celle qui provenait de l'électricité dégagée dans le vide mercuriel; elle était d'un rouge tirant sur le pourpre avec l'huile, et d'un blanc pur avec le chlorure d'antimoine. Ajoutons que lorsque la température est très-basse, il faut une décharge assez forte pour qu'elle puisse être transmise à travers le vide barométrique. Ces expériences de Davy montrent le rôle important que jouent dans la production de la lumière électrique les corps entre lesquels passent

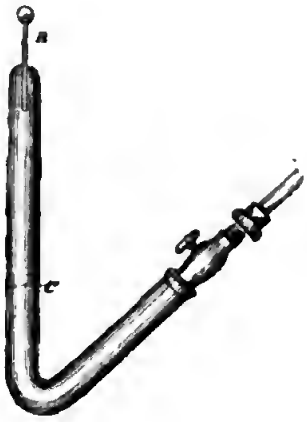


Fig. 214.

les décharges et les particules qui très-probablement en sont détachées par cette décharge elle-même.

L'étincelle change aussi d'apparence si, au lieu de la transmettre à travers l'air ou un espace vide, on la fait passer dans différents milieux gazeux. Dans l'azote, les étincelles sont plus brillantes que dans l'air et surtout sont accompagnées d'un son très-remarquable; dans l'oxygène, elles sont plus blanches que dans l'azote ou dans l'air, mais non aussi brillantes. Dans l'hydrogène, leur couleur est cramoisie; dans le gaz hydrochlorique sec l'étincelle est toujours blanche; et ces différences tiennent sans doute à la facilité plus ou moins grande avec laquelle les divers gaz permettent le passage de la décharge, ainsi que nous l'avons vu dans le chapitre précédent[1]. Faraday, à qui nous devons ces diverses observations, a aussi remarqué qu'on peut également obtenir l'étincelle dans divers liquides, tels que l'essence de térébenthine, l'huile d'olive, la résine et le verre fondus, l'eau elle-même, etc.

L'aigrette varie aussi d'apparence comme l'étincelle avec les différents milieux dans lesquels on la produit. Nous avons vu par l'expérience de l'œuf électrique que dans l'air raréfié, elle est extrêmement brillante et se compose de branches très-allongées; il en est de même dans tous les gaz; dès qu'on les raréfie, l'étincelle se convertit graduellement en une aigrette qui devient de plus en plus considérable et ramifiée d'une manière distincte, jusqu'à ce qu'à un certain degré de raréfaction, les aigrettes qui proviennent des conducteurs positif et négatif se réunissent de manière à former entre elles un jet lumineux continu. Le phénomène varie avec la grandeur du vase, le degré de raréfaction et la force de l'étincelle que donne la machine. Si nous examinons maintenant l'apparence des aigrettes dans les divers gaz, nous trouvons que dans l'oxygène elles sont très-comprimées et en général bien plus faibles que dans l'air. C'est l'inverse dans l'azote; ce gaz est celui dans lequel elles sont le plus lumineuses, et dans l'azote raréfié en particulier elles sont magnifiques. Dans l'hydrogène, elles sont bien moins

[1] Tome II, page 99.

brillantes que dans l'azote, mais plus que dans l'oxygène; leur couleur est d'un vert gris. Dans l'oxyde de carbone et le gaz acide carbonique, elles sont difficiles à produire, elles sont courtes et leur lumière est faible. Dans le gaz acide hydrochlorique, l'aigrette est encore plus difficile à obtenir à des pressions ordinaires. En augmentant graduellement la distance des deux extrémités arrondies des conducteurs entre lesquels se fait la décharge dans ce gaz, les étincelles cessent, et à une distance de deux centimètres entre ces extrémités la décharge a lieu sans lumière et sans bruit; il est probable qu'il s'opère dans ce cas une décharge électrolytique, c'est-à-dire une décomposition électrochimique du gaz; c'est ce que nous verrons dans le chapitre suivant.

L'aigrette s'observe non-seulement dans l'air et dans les gaz, mais également dans des milieux plus denses. Faraday a réussi à la produire dans de l'essence de térébenthine en y plongeant le bout d'un fil de métal placé dans un tube de verre, le liquide étant lui-même dans un vase de métal. L'aigrette était très-petite et difficile à obtenir, ses ramifications étaient peu nombreuses et divergeaient beaucoup les unes des autres, et il fallait une chambre bien obscure pour l'observer, tant ses ramifications étaient faibles. Une chose assez remarquable, c'est que, tandis que le milieu où elle se propage peut singulièrement modifier l'aigrette, la nature du corps d'où elle sort ne semble exercer sur elle d'autre influence que celle qui résulte du degré plus ou moins grand avec lequel ce corps facilite, suivant sa conductibilité, la décharge de la machine. Il en est de même pour l'aigrette négative; mais celle-ci, comme la positive, éprouve de la part du milieu où elle se produit des effets prononcés. Ainsi la raréfaction de l'air facilite son développement encore plus qu'elle ne facilite celui de la positive. La supériorité de l'aigrette positive sur la négative qui est déjà bien considérable dans l'air est encore plus grande dans l'azote. Dans l'hydrogène, au contraire, l'aigrette positive perd une partie de sa supériorité, tandis que la négative n'est que peu ou point affectée. Enfin, dans l'oxygène, l'acide carbonique et l'acide hydrochlorique, toute différence disparaît entre les deux

aigrettes, de sorte qu'il est très-difficile de les distinguer l'une de l'autre.

Il existe encore, outre l'étincelle et l'aigrette, une forme particulière sous laquelle se manifeste la lumière produite par la décharge, et que nous désignerons sous le nom de *lueur*. Elle se montre quand on diminue la surface de la boule et de la tige qui communique avec la machine; les aigrettes disparaissent alors et sont remplacées par une lueur phosphorescente continue, qui couvre tout le bout du fil. Cette forme lumineuse semble provenir de la rapidité avec laquelle la charge se renouvelle, car en augmentant la force de la machine et la raréfaction de l'air, on favorise sa production.

La lueur s'obtient beaucoup plus difficilement avec l'électricité négative qu'avec la positive; il faut, pour la produire, raréfier l'air, et en ajustant les deux boules à une distance convenable on peut obtenir sur la négative une lueur qui la recouvre entièrement aussi bien quand elle est inductrice qu'induite. On voit les deux boules et une partie même assez longue des deux tiges qui les portent recouvertes de cette lumière électrique.

La lueur se présente dans tous les gaz également; Faraday croit l'avoir obtenue dans l'essence de térébenthine, mais très-faible et peu visible; elle est accompagnée dans l'air d'un souffle venant en général de la partie lumineuse, mais quelquefois aussi dirigé vers elle. Aussi est-elle probablement due à une charge ou décharge très-rapide de l'air qui entoure le conducteur, et qui lui reste adhérent même dans le vide le plus parfait. Cet air, en vertu de l'électricité qu'il acquiert et qu'il perd, prend un mouvement régulier et donne lieu à une lueur continue, sans qu'il y ait aucune apparence d'agitation. En preuve de cette explication, Faraday cite une expérience dans laquelle il a réussi à convertir une aigrette en simple lueur en facilitant la formation d'un courant d'air à l'extrémité du conducteur où se produisait l'aigrette. De même, en gênant le courant d'air, on peut changer une simple lueur en aigrette. Il est facile de suivre le passage de la lueur à l'aigrette et de l'aigrette à l'étincelle. Tout ce qui tend à faciliter la charge de l'air par le con-

ducteur électrisé et à conserver à ce conducteur sa même tension, malgré la décharge, contribue à produire la lueur; tandis que les circonstances qui empêchent l'air ou les autres gaz de se charger d'électricité et qui favorisent l'accumulation de l'électricité sur le conducteur, déterminent des décharges intermittentes sous formes d'aigrettes et d'étincelles. Aussi la condensation de l'air, le voisinage de la main ou d'une surface conductrice agissant par influence, le rapprochement graduel d'une boule destinée à recevoir la décharge, provoquent la cessation de la lueur et son changement en aigrette ou en étincelle. En résumé, la continuité de la décharge produit la lueur, la discontinuité produit l'aigrette et l'étincelle quand elle devient plus prononcée.

Il arrive souvent que, dans son trajet à travers un milieu transparent, la décharge électrique n'est pas partout lumineuse; c'est ce que Faraday a nommé *décharge obscure*. Ainsi, si l'on écarte l'une de l'autre deux tiges métalliques entre les extrémités desquelles passe la décharge dans de l'air raréfié, on voit une lueur continue sur le bout de la tige négative, tandis que l'extrémité positive reste tout à fait obscure. A mesure que la distance augmente, une traînée de lumière pourpre ou blanche paraît à l'extrémité de la tige positive, et s'avance directement sur la tige négative; elle s'allonge, mais cependant sans joindre jamais la lueur négative, de sorte qu'il y a toujours entre elles un petit espace obscur (fig. 215.). Cet espace, large

Fig. 215.

de 1 à 2 millimètres environ, demeure invariable dans son étendue et dans sa position par rapport à la pointe négative; la lueur négative ne change pas non plus, tandis qu'on voit la lumière pourpre de la pointe positive s'allonger ou se raccourcir à mesure qu'on fait varier la distance des deux pointes. Un effet du même genre se présente dans tous les gaz; seulement il faut éloigner plus ou moins l'une de l'autre, suivant la nature des gaz, les extrémités des deux tiges, pour avoir la décharge

obscure. En général, la position de l'espace obscur est constante, et on peut s'assurer, en examinant avec soin le phénomène, que cet espace existe entre la lueur positive et la lueur négative, lors même que, par la forme concave de la première lueur et convexe de la seconde, il est difficile à observer. Cette expérience montre que la décharge peut être transmise à travers un gaz sans le rendre nécessairement lumineux.

Faraday, qui a beaucoup étudié cette question, estime que la décharge obscure a lieu à une très-faible tension, et qu'après qu'elle a commencé, la lumière est la conséquence de la plus grande quantité d'électricité qui se précipite par la même route, trouvant dans cette direction un passage plus facile.

On peut obtenir la décharge sous forme de lueur et la décharge obscure d'une manière très-prononcée, par les étincelles que produisent les appareils d'induction, notamment celui de Rumkorff[1]. Il suffit de faire communiquer respectivement les deux extrémités du fil induit avec les boules de l'appareil, dit œuf électrique (fig. 212), pour obtenir, en raréfiant l'air, des lueurs de toute beauté autour des deux boules, avec cependant quelques différences à la boule négative et à la positive. M. Rumkorff, qui a répété en les variant les expériences de MM. Masson et Breguet, a remarqué que la lumière qui entoure la boule et la tige négative est violette, et que celle qui est autour de la boule positive est d'un rouge de feu, et qu'elle s'étend sur la boule négative. Il jaillit aussi ainsi des deux boules quelques étincelles plus blanches et distinctes des lueurs qui proviennent probablement, comme on le verra, de particules métalliques détachées des boules. M. Gassiott a observé que, lorsque le vide est bien fait, la moitié de la boule négative est entourée d'une flamme brillante bleue, tandis qu'il s'échappe de la boule positive un filet de lumière brillante et rouge; mais il y a entre le filet rouge et la flamme bleue un espace complétement sombre.

M. Quet, de son côté, a découvert que la double lumière qui émane des deux boules se compose d'une suite de couches

[1] Tome I, page 495, fig. 150.

brillantes entièrement séparées les unes des autres par des couches obscures, et qu'elle est comme stratifiée. Pour bien observer ce phénomène de stratification, il suffit de la présence, dans le vide fait dans l'œuf électrique, d'une très-petite quantité d'alcool [1], d'essence de térébenthine, de sulfure de carbone ou d'huile de naphte. En faisant passer entre les boules le courant d'induction de la machine de Rumkorff, on observe une multitude de couches brillantes séparées par des couches obscures formant comme une pile de lumière électrique entre les deux pôles. La stratification est plus prononcée dans la lumière rouge du pôle positif que dans la violette du négatif, mais le nombre des couches alternativement obscures et brillantes y est moins considérable. Il est facile, du reste, de constater que la lumière du pôle positif est séparée de celle du pôle négatif par une couche obscure qu'on peut rendre plus ou moins épaisse, suivant la perfection du vide et la nature de la vapeur qu'il renferme.

La lumière dans ces expériences n'a pas une durée continue ; elle consiste, en effet, dans une suite de décharges qui se succèdent avec rapidité. Cela donne lieu à un mouvement oscillatoire des couches lumineuses qui rend les observations un peu difficiles. Pour éviter cet inconvénient, M. Quet fait manœuvrer à la main le petit marteau magnétique de l'appareil Rumkorff, et à chaque mouvement on obtient une émission de lumière vive, mais qui ne dure qu'un instant; la succession entière des couches, alternativement brillantes et obscures, se dessine ainsi avec une forme très-nette ; en renouvelant cette manœuvre à volonté, on peut étudier facilement les détails du phénomène.

La couleur de la lumière varie avec la nature des vapeurs que contient le vide; avec celle de l'essence de térébenthine, on a au pôle positif une belle lumière blanche et phosphorescente, dont la stratification a lieu par couches planes, mais d'épaisseurs inégales; avec la vapeur du fluorure de silicium

[1] M. Rumkorff avait obtenu le premier ce phénomène de stratification, en plaçant quelques instants au-dessus d'un flacon ouvert rempli d'alcool l'ouverture de l'œuf électrique avant d'y faire le vide.

Digitized by Google

on a une lumière jaune au pôle négatif. Si on approche beaucoup les deux boules l'une de l'autre, on finit par faire disparaître l'une ou l'autre des deux lumières; cela dépend de la nature du vide; dans le vide où il ne reste que l'air très-raréfié, c'est la lumière rouge du pôle positif qui disparaît complétement, la violette du négatif demeure seule.

Ce dernier phénomène est précisément le même que celui désigné par Faraday sous le nom de décharge obscure. Nous venons de voir, en effet, que lorsque l'étincelle est produite dans l'air raréfié et entre deux conducteurs très-rapprochés, le conducteur négatif seul s'environne d'une auréole bleue, et le conducteur positif demeure obscur, tandis que dans l'atmosphère les deux conducteurs paraissent également lumineux. L'électricité se décharge donc du conducteur positif sans produire de lumière aussi bien avec des courants d'induction qu'avec l'électricité d'une machine ordinaire.

Déjà avant M. Quet, M. Neef, en observant au microscope le passage d'un courant d'induction entre une pointe de platine et une lame oscillante du même métal au moyen d'un appareil semblable à celui que nous avons déjà décrit[1], avait reconnu que l'électrode négatif était seul lumineux. Il avait cru pouvoir conclure de cette observation que l'étincelle électrique engendre, à l'électrode négatif, de la lumière sans chaleur, et à l'électrode positif, de la chaleur sans lumière. Nous reviendrons plus tard sur le travail de M. Neef, nous nous bornerons pour le moment à remarquer que c'est toujours le même phénomène de la décharge obscure, avec cette différence seulement, assez importante, qu'il se passe dans l'air au lieu de se passer dans le vide. M. Riess a réussi à démontrer que la différence est plus apparente que réelle, parce que, lorsque les étincelles se succèdent très-rapidement dans un espace très-resserré, l'air se raréfie promptement entre les électrodes. En effet, en faisant varier à volonté la distance qui sépare la plaque et la pointe de platine, Riess remarque que lorsque la distance est un peu grande, l'étincelle n'offre rien de particulier; on a

[1] Tome I, p. 393, figure 149.

un arc lumineux continu à chaque étincelle entre la plaque et la pointe; en diminuant la distance on obtient des étincelles de plus en plus nombreuses et rapprochées; enfin, à une distance plus petite encore, l'étincelle perd tout son éclat, et en même temps une vive lumière bleue se montre à la surface de l'électrode négatif seulement. On aperçoit dans cette lumière bleue, en l'observant au moyen du microscope, un certain nombre de points blancs très-brillants qui semblent être des particules de platine incandescent détachées par la décharge, ce que confirme l'état de rugosité que présente la surface de la lame de platine après qu'elle a longtemps servi à ces expériences. Ajoutons que M. Gassiott a observé, en employant pour électrodes deux fils de platine distants de $2\frac{1}{2}$ millim., que le fil négatif devient rouge feu, tandis que le positif reste froid; dans ce cas, la décharge est très-rapide et continue. Cet effet serait l'inverse de celui qu'a signalé M. Neef, et contraire à ce qui se passe avec les courants ordinaires. Ces oppositions peuvent tenir à la difficulté qu'il y a à bien distinguer dans les courants d'induction le pôle positif du négatif. Il ne faut pas perdre de vue non plus qu'il se passe des effets électrochimiques, provenant de la décomposition des gaz ou des vapeurs raréfiées que traversent les décharges, qui peuvent contribuer aux apparences que présente la lumière; nous les ferons connaître dans le chapitre suivant.

Après avoir étudié l'étincelle électrique, la manière dont elle prend naissance et les différentes formes qu'elle affecte, il nous resterait à examiner ses diverses propriétés; mais nous renvoyons cet examen au paragraphe 8, afin de le faire comparativement avec celui de l'arc voltaïque, et de pouvoir ainsi, en appréciant les différences qui caractérisent ces deux formes du même phénomène, remonter à leur cause commune. Nous nous bornerons à dire quelques mots ici des effets calorifiques de l'étincelle, dont nous avons déjà eu des exemples dans l'inflammation des corps combustibles, et en particulier dans l'expérience du pistolet de Volta. La chimie tire un grand parti de cette propriété de l'étincelle électrique pour déterminer la combinaison des mélanges gazeux. On les introduit dans un tube en verre à

parois très-fortes et graduées : ce tube, fermé à l'une de ses extrémités, repose par son extrémité ouverte sur une cuve pneumatique remplie d'eau, ou encore mieux de mercure. Deux pointes de métal, ordinairement en platine, pénètrent intérieurement dans la partie supérieure du tube, aux parois duquel elles sont hermétiquement scellées, de manière à laisser entre elles un intervalle de 1 à 3 millimètres au plus; pour faire jaillir l'étincelle à travers le mélange gazeux, on met les pointes métalliques en communication, par leur extrémité extérieure, avec les armures d'une bouteille de Leyde ; on porte ainsi le feu dans l'intérieur du tube sans avoir besoin de le chauffer extérieurement. Le même effet peut être produit par l'incandescence d'un fil fin de platine au moyen d'un courant, preuve que la combinaison est bien due à la chaleur dégagée aussi bien dans l'étincelle que dans le fil, et qu'elle n'est pas un effet immédiat de l'électricité. Du reste, nous étudierons plus en détail dans le chapitre suivant les effets chimiques de l'étincelle.

Nous avons d'autres preuves de la chaleur de l'étincelle dans les traces qu'elle laisse sur les conducteurs entre lesquels elle s'échappe. Priestley, qui les a découvertes, avait remarqué qu'elles sont circulaires, et qu'elles se forment sur des plaques métalliques qui reçoivent l'étincelle sortie d'un conducteur en pointe situé à 1 ou 2 millimètres de distance. Nobili, qui les a étudiées avec soin sur différents métaux, a montré qu'elles sont dues à la chaleur interne, et même à un commencement de fusion qu'éprouvent ces métaux. La forme circulaire qu'elles affectent est liée à la forme semblable de l'aigrette et tient à la dissémination des filets électriques.

Malgré ces preuves évidentes de la haute température de l'étincelle, M. E. Becquerel n'a pu y découvrir de traces de chaleur rayonnante, ce qui tient surtout à son instantanéité. C'est ce qui fait également qu'elle ne peut pas, dans les conditions ordinaires, enflammer certains corps très-combustibles qui, comme la poudre à canon, exigent pour prendre feu l'application de la chaleur pendant un temps qui ne soit pas trop court. Mais on peut réussir à produire cette inflammation en obligeant

la décharge à passer à travers un conducteur imparfait qui en diminue la rapidité et augmente ainsi la durée de l'étincelle, par exemple, à travers un fil humecté d'eau. Avec un tube en verre de 16 centimètres de longueur et de 8 millimètres de diamètre, fermé à ses deux bouts par des bouchons au travers desquels on fait passer des fils métalliques pour conduire la décharge dans le liquide dont on remplit l'intérieur du tube, on remarque que si ce liquide est de l'eau pure ou de l'éther, il faut charger une bouteille de $0^m,1$ de surface, jusqu'à 60° de l'électromètre pour enflammer la poudre par la décharge de la bouteille, jusqu'à 30° seulement si le liquide est de l'alcool, et qu'avec des acides l'inflammation n'a plus lieu, lors même qu'on charge jusqu'à 80°. Les différences tiennent à ce que l'étincelle, pour produire son effet, doit avoir à la fois et une certaine intensité et une certaine durée, éléments inverses l'un de l'autre, et dont la valeur relative dépend de la conductibilité plus ou moins grande des liquides.

Indépendamment de la lumière et de la chaleur, l'étincelle électrique développe dans certains corps, en les traversant, la phosphorescence, c'est-à-dire la propriété de paraître lumineux dans l'obscurité, lors même qu'ils ne l'étaient pas auparavant. De tous les corps, les écailles d'huître calcinées sont ceux qui deviennent le plus facilement phosphorescents, quand ils ont été placés sur la route de la décharge électrique. Cependant, bien d'autres substances, telles que le spath-fluor, le diamant, le marbre blanc, jouissent de la même propriété de devenir phosphorescents après l'action de quelques décharges. Toutefois la seule lumière des étincelles peut produire le même effet sans qu'il soit nécessaire que la décharge traverse les corps; propriété que nous étudierons dans le paragraphe 8, où nous nous occuperons de la lumière électrique dont nous verrons que la phosphorescence n'est, au fond, qu'un cas particulier.

§ 7. Effets calorifiques et lumineux des courants électriques à travers les conducteurs imparfaits. — Arc voltaïque.

L'électricité voltaïque peut donner naissance, comme celle des machines, à des étincelles électriques; mais en général ces

étincelles se manifestent quand on met en contact, ou, encore mieux, quand on sépare les fils ou les lames métalliques qui communiquent avec les deux pôles de la pile; c'est plus un phénomène d'ignition voltaïque qu'une véritable étincelle électrique; il semble provenir de l'échauffement qu'éprouvent les deux points en contact des deux fils métalliques, à cause de la plus grande résistance que le courant rencontre dans cette partie du circuit. En effet, quand on réunit bout à bout, en les attachant par de simples boucles les uns aux autres, plusieurs fils métalliques, c'est toujours à leurs points de contact que l'incandescence se manifeste d'abord pour se propager de là dans le reste des fils. Nous avons déjà parlé dans le paragraphe 2 des phénomènes d'ignition ou de déflagration que présentent les divers métaux; nous ajouterons simplement que la production des étincelles voltaïques est accompagnée d'un pétillement assez semblable à celui des étincelles électriques, et qu'elle a lieu dans l'air raréfié comme dans l'air ordinaire, seulement avec quelques différences d'apparence chez les métaux oxydables, qui tiennent à ce que la combustion y est moins vive.

Davy réussit le premier à obtenir les étincelles voltaïques dans les liquides en fermant le circuit au moyen de deux petits morceaux de charbon. On voyait jaillir de vives étincelles, et il y avait en même temps abondante production de gaz; les extrémités du charbon paraissaient d'un rouge blanc quelque temps encore après le contact. Le liquide était indifféremment de l'eau, des huiles fixes ou volatiles, de l'éther, de l'alcool, des acides nitrique et sulfurique; les gaz qui étaient produits dans cette action variaient avec la nature des liquides. C'était une décomposition provenant plus de l'action directe de la chaleur dégagée au point de contact des deux pointes de charbon que de l'action décomposante du courant qui ne traversait à peu près pas le liquide, puisque les deux morceaux de charbon étaient en contact. Nous reviendrons, dans le chapitre suivant, sur cet effet chimique de l'étincelle voltaïque, qu'il ne faut pas confondre avec l'action décomposante directe du courant.

M. Marianini a étudié longtemps après Davy la production

des étincelles voltaïques dans les liquides, mais il l'a fait dans des conditions très-différentes. C'était en se servant d'une pile très-faible et d'un tube en forme de syphon renversé, dans lequel était du mercure qui s'élevait en deux colonnes dans les branches verticales du tube, sans les remplir. Dans l'un des tubes plongeait un fil en communication avec l'un des pôles de la pile; dans l'autre, le fil communiquant avec l'autre pôle, plongeait dans un liquide tel que l'eau ou tout autre placé au-dessus de la couche de mercure. L'épaisseur de la couche liquide que l'étincelle pouvait traverser était très-petite, d'un demi-millimètre au plus; sa production était facilitée par un mouvement oscillatoire particulier que le mercure éprouve au moment où le circuit est fermé, et ce mouvement, en se continuant, produisait une succession d'étincelles. La nature des fils métalliques qui ferment le circuit est sans influence sur le phénomène. Il n'en est pas de même de la nature du liquide dans lequel jaillissent les étincelles. Ce sont les moins conducteurs qui favorisent en général leur production. On peut même les faire paraître à travers de l'huile en ayant soin d'enfoncer le fil jusqu'à son contact avec le mercure, et de le retirer ensuite vivement; c'est à ce moment que l'étincelle a lieu en traversant la mince couche d'huile. En soulevant le fil et en l'abaissant ainsi jusqu'à lui faire toucher le mercure, on obtient chaque fois une étincelle. Avec l'eau et l'alcool, les effets sont semblables; seulement, la production de l'étincelle dans l'huile est accompagnée d'un bruit particulier qui n'a pas lieu avec les deux autres liquides. M. Marianini avait encore remarqué que la couleur des étincelles est la même dans les liquides que dans l'air, et que les circonstances les plus favorables à leur production sont aussi les mêmes dans les deux cas; qu'ainsi elles se montrent plus facilement entre deux pointes de charbon qu'entre deux pointes métalliques.

Indépendamment de ces petites étincelles, plus ou moins discontinues et ne se manifestant qu'au contact ou qu'à de très-petites distances[1], l'électricité voltaïque peut donner nais-

[1] M. Gassiott a, au moyen d'une pile de 3,500 petits couples cuivre et zinc chargés

sance à un phénomène lumineux du même genre, mais bien plus remarquable, tant par son intensité que par sa continuité. C'est le phénomène de l'arc voltaïque découvert par Davy.

L'illustre chimiste se servit, pour l'obtenir, d'une pile de 2,000 couples, zinc et cuivre de 32 pouces carrés [1] de surface chacun, présentant ainsi une surface totale de 128,000 pouces carrés [2], chargés avec de l'eau acidulée. Ayant terminé les conducteurs qui aboutissaient à chacun des pôles par deux morceaux de charbon longs de 3 centimètres environ et de 5 à 6 millimètres de diamètre, il plaça leurs extrémités taillées en pointe à une distance d'un millimètre à peu près l'une de l'autre, et il vit paraître une étincelle brillante en même temps que les charbons devenaient incandescents dans la moitié de leur longueur. Il réussit à écarter les charbons l'un de l'autre jusqu'à une distance de plus de 11 centimètres sans faire cesser le phénomène qui se manifestait comme une gerbe continue de feu, passant de l'une des pointes de charbon à l'autre en forme d'arc convexe en dessus, probablement à cause du courant ascendant d'air chaud. Lorsqu'on introduisait dans cet arc une substance quelconque, elle devenait incandescente; le platine s'y fondait comme la cire à la flamme d'une chandelle; le saphir, la magnésie, la chaux, tout ce qu'il y a de plus réfrac-

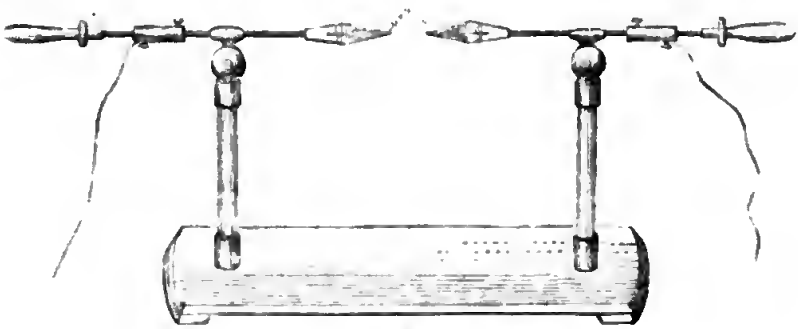


Fig. 216.

taire, entraient en fusion. Des fragments de diamant, des

avec de l'eau pure, obtenu, entre deux disques de laiton distants de $\frac{1}{2}$ millimètre seulement, une série d'étincelles semblables à celles de la machine électrique.

[1] 206 centimètres carrés.

[2] 824,000 centimètres carrés.

pointes de charbon et de plombagine, disparaissaient rapidement et semblaient s'évaporer dans ce foyer sans paraître subir de fusion préalable.

Pour produire ce phénomène on se sert d'un appareil (fig. 216) dans lequel deux tiges métalliques mobiles, dans le sens horizontal comme celles de l'excitateur universel, sont portées sur deux supports verticaux isolants; les tiges sont munies chacune d'une pince destinée à recevoir les pointes de charbon, et sont mises respectivement en communication, au moyen de conducteurs, avec les pôles de la pile. Des manches de verre ou de bois permettent d'éloigner ou de rapprocher à volonté les deux pointes l'une de l'autre. Quand on veut produire l'arc voltaïque dans le vide ou dans l'air très-raréfié, on se sert d'un appareil (fig. 217) formé d'un globe de verre où

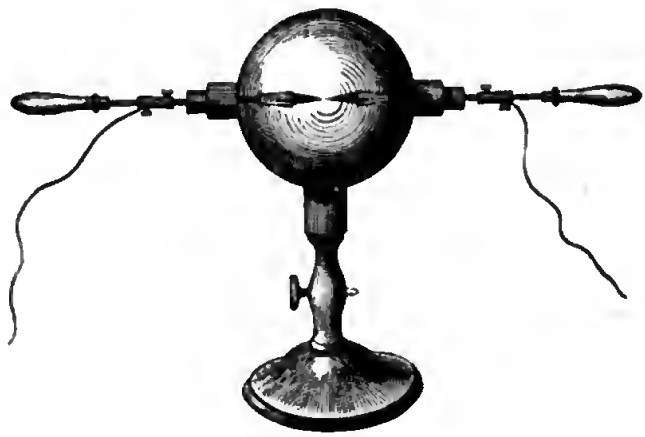


Fig. 217.

pénètrent, à travers deux boîtes à cuir placées sur le même diamètre horizontal, les deux tiges munies des pointes de charbon. Un robinet, fixé au tube métallique qui sert de support au ballon, permet d'y produire et d'y maintenir de l'air très-raréfié, et au besoin d'y introduire différents gaz sous des pressions plus ou moins fortes.

Davy avait déjà remarqué que le phénomène de l'arc voltaïque se produit dans le vide aussi bien et même mieux que dans l'air, preuve que la combustion qui l'accompagne dans l'air n'est point la cause de la chaleur et de la lumière qui s'y

développent. Il réussit même, en éloignant les pointes, à donner à l'arc dans le vide une longueur de 16 à 18 centimètres, c'est-à-dire presque double de celle qu'il avait dans l'air; du reste, la lumière était tout aussi vive et la chaleur tout aussi forte, car le charbon était fortement incandescent; du platine en fil se fondait avec une scintillation brillante et tombait en globules au fond du ballon.

Longtemps après la brillante expérience de Davy, le professeur Sillimann, en la répétant avec une pile à couples cylindriques du docteur Hare, nommée par lui déflagrateur, observa des phénomènes moléculaires très-remarquables. Il faisait communiquer de la plombagine avec le pôle positif et un morceau de charbon bien recuit avec le pôle négatif. On apercevait bientôt des globules de plombagine fondus et une excavation hémisphérique sur la plombagine elle-même, tandis que le charbon était allongé du côté de la plombagine, et la matière noire qui s'y amoncelait présentait l'apparence de fusion, non en globules, mais en fibres striées. Cette matière provenait évidemment de la plombagine du pôle positif, qui avait été transportée dans l'état de vapeur au pôle négatif. En renversant les pôles, on ne voyait se former que très-peu de globules sur la plombagine et aucun sur le charbon; mais ce dernier était rapidement creusé; la plombagine, au contraire, s'allongeait par la matière qui s'accumulait à son extrémité, et qui, vue au moyen du microscope, présentait une agrégation de petites sphères avec le caractère d'une parfaite fusion et avec un éclat métallique prononcé. Les sphères semblaient être formées par la condensation d'une vapeur blanche, semblable à celle des oxydes provenant de la combustion de différents métaux. Les globules eux-mêmes, chauffés fortement dans le gaz oxygène, donnaient de l'acide carbonique et un résidu de fer attirable à l'aimant. M. Sillimann avait cru trouver quelque analogie entre ces substances charbonneuses fondues et le diamant, mais les globules dont il s'agit rayent seulement le verre, sont attirables à l'aimant et n'éprouvent aucune altération dans l'oxygène à la plus haute température, tandis que le diamant ordinaire n'est point attirable, raye tous les corps

et brûle dans l'air à une chaleur rouge. Il est donc très-probable que les premiers tiennent de la nature des scories provenant du fer que renferme la plombagine[1].

Quant au passage de la matière d'un pôle à un autre, M. Sillimann l'a très-bien observé. En protégeant ses yeux par un verre vert, il voyait distinctement la matière passer sous différentes formes au pôle négatif et s'y rassembler comme l'aurait fait de la poussière poussée par le vent; il remarquait aussi au pôle positif une espèce de trépidation produite comme par l'impulsion d'un fluide élastique frappant contre le pôle opposé. J'ai observé moi-même ce dernier phénomène sans avoir besoin d'une pile bien forte; une pile de Grove de dix couples est suffisante. Il faut fixer les deux pointes de charbon à deux tiges métalliques recourbées en équerre, et assez élastiques pour que les deux pointes puissent être en contact par leurs deux extrémités, sans qu'il y ait la moindre pression de l'une contre l'autre. Aussitôt que le courant est établi, la lumière jaillit entre les pointes, et l'on entend comme une série rapide de petites détonations qui, en se communiquant du charbon au métal, font vibrer ce dernier de manière à produire un son et même à rendre les vibrations sensibles au contact. Ce bruit ne provient ni des attractions ou répulsions électriques, ni d'un frottement qui aurait lieu entre les pointes, car il est le même avec le charbon le plus mou, comme du charbon de peuplier, qu'avec deux pointes du charbon le plus dur, tel que celui qu'on recueille des cornues à gaz. C'est une espèce de craquement régulier qui s'opère entre les molécules du charbon traversé par le courant, et qui est lié avec l'arrachement et le transport de ces molécules. On n'entend plus ce bruit quand

[1] Cependant M. Despretz est parvenu, en se servant comme électrode négatif d'une espèce de pinceau formé de fils fins de platine et d'un fragment de charbon très-pur pour électrode négatif, à obtenir par la formation de l'arc entre ces deux électrodes des points très-brillants aux extrémités des fils de platine, qui vus à la lampe, essayés par des joailliers, ont présenté toute l'apparence de petits fragments de diamant. Il a également réussi à s'en procurer de semblables en remplaçant le charbon solide par un hydrogène carboné liquide. Nous y reviendrons quand nous nous occuperons des effets chimiques de l'électricité dynamique.

on remplace les pointes de charbon par de l'éponge de platine, quoique dans ce cas il y ait comme avec le charbon, ainsi que je m'en suis assuré, un transport de particules du pôle positif au négatif. Ces particules forment, par leur réunion, comme des espèces de ramifications que la haute température produite par le courant rend incandescentes et consolide par la fusion, de manière qu'on peut les détacher facilement sans altérer leur forme.

On voit, par ce dernier exemple, que l'arc voltaïque peut être produit, non pas seulement entre deux pointes de charbon, mais aussi entre deux conducteurs métalliques tels que du platine spongieux; il n'est pas même nécessaire que le métal ait l'état d'éponge. Ainsi on peut l'établir entre deux pointes de platine forgé, mais alors il est moins long, et il exige une pile plus forte pour sa production.

L'apparence et la longueur de l'arc varient considérablement avec la nature des électrodes entre lesquels il se manifeste. Ainsi, avec le charbon de bois bien recuit et trempé dans l'eau [1], la lumière est beaucoup plus vive, surtout plus blanche qu'avec du coke; mais ce charbon exige une pile à plus forte tension. Daniell, avec une pile de 70 couples cuivre et zinc chargés avec du sulfate de cuivre et de l'eau aiguisée d'acide sulfurique, obtint un arc très-brillant, soit avec deux pointes de ce charbon, soit avec une pointe de charbon et une pointe de platine. M. Despretz, dans une série de belles expériences faites avec une pile très-forte, avait trouvé des longueurs très-variables pour l'arc, suivant le nombre et la disposition des couples de Bunzen, qui étaient ceux dont il faisait usage. Il produisait l'arc dans l'air, mais en le renfermant dans une cage de verre, ayant observé que l'agitation de l'air le dérange beaucoup. Il fixait les pointes de charbon, qui étaient de coke convenablement préparé, à l'extrémité de tiges de cuivre d'un

[1] On emploie quelquefois le charbon de bois trempé dans du mercure; on peut avec ce charbon produire l'arc avec une pile beaucoup moins forte, mais la lumière en est moins brillante, et il se forme des vapeurs de mercure qui troublent le phénomène.

centimètre de diamètre; l'arc était vertical. Voici ses longueurs : 25 couples, 25^{mm}; 100 en séries parallèles de 100, 183^{mm},9; 24 séries de 25, 11^{mm},5; les 600 à la suite les uns des autres, 162^{mm}. Pôle + en bas 56^{mm}, pôle + en haut 74^{mm}. M. Despretz a toujours observé dans l'arc quelques parties obscures. Enfin il a fait des observations curieuses sur la soudure très-puissante qui a lieu entre les bâtons de charbon qui forment l'arc quand on les met en contact, surtout entre ceux qui ont été préparés en calcinant du sucre candi.

En général, pour obtenir l'arc, il faut commencer par mettre les deux pointes en contact; puis, quand le point de contact est devenu incandescent, on écarte graduellement les deux électrodes. Cependant Daniell a réussi à déterminer l'arc sans mettre préalablement les électrodes en contact, uniquement en faisant passer entre eux une forte étincelle électrique. C'est ce qui fait qu'avec des piles à très-haute tension, qui peuvent donner une étincelle à distance, on obtient l'arc entre deux pointes sans avoir besoin de les faire toucher.

Fizeau et Foucault, en opérant avec une pile de 80 couples de Bunzen, dont l'un des électrodes était de charbon et l'autre une tige métallique d'argent ou de platine, ont remarqué des différences dans la longueur de l'arc et dans sa durée, selon que le métal ou le charbon communiquent avec le pôle négatif ou le pôle positif.

M. Grove avait déjà observé que la longueur de l'arc et son éclat dépendaient de la nature des métaux entre lesquels il est produit, les deux électrodes étant dans chaque cas du même métal. Voici l'ordre dans lequel il les avait classés sous ce rapport, en commençant par ceux qui donnent l'arc le plus long et le plus brillant, et en supposant que le phénomène ait lieu dans l'air : potassium, sodium, zinc, mercure, fer, étain, plomb, antimoine, bismuth, cuivre, argent, or et platine. M. Grove avait remarqué également qu'une partie de la substance d'où s'échappe l'arc lumineux est projetée du pôle positif au négatif, et qu'elle est à l'état de poudre métallique si le milieu ambiant est le vide, l'hydrogène ou l'azote, et à l'état d'oxyde dans l'oxygène ou dans l'air.

Toutefois, le fait du transport des molécules du pôle positif au négatif n'est point aussi général qu'on l'a cru longtemps. M. Van Breda, en opérant dans le vide et en déterminant l'arc voltaïque sans mettre préalablement les électrodes en contact, mais au moyen d'une forte décharge électrique, a obtenu un transport dans les deux sens également, suivant la nature relative des deux métaux entre lesquels l'arc s'échappe. Avec deux boules de fer, il a trouvé qu'après l'expérience la boule positive avait perdu 309 milligrammes, et la négative, au lieu d'avoir gagné, en avait aussi perdu 55. Avec une boule de fer et un cône de coke préparé comme le coke qui sert aux piles de Bunzen, le fer perdait à peu près autant, qu'il fût positif ou négatif, et le coke perdait plus dans le premier cas que dans le second. Une expérience qui prouve bien qu'il peut se faire une émanation de particules des deux pôles également, quoique plus forte du positif au négatif que du négatif au positif, consiste à placer entre deux boules de cuivre servant d'électrodes une lame de fer épaisse et isolée. L'expérience a lieu dans le vide, et l'arc est déterminé par une décharge électrique. La boule positive gagne en poids 63 milligrammes, et la négative 360; toutes les deux sont recouvertes de molécules de fer qui proviennent de la plaque. Il semble donc que la matière est repoussée en même temps des deux pôles, ou plutôt qu'il existe une répulsion entre les particules métalliques qui conduisent le courant[1].

J'ai moi-même étudié la formation de l'arc voltaïque en employant des électrodes de différents métaux, soit tous les deux taillés en pointe, soit l'un seulement en pointe, l'autre ayant la forme d'une plaque. Pour mesurer avec soin la longueur de l'arc, je me suis servi de deux appareils, l'un destiné à le mesurer dans l'air, l'autre à le mesurer dans le vide ou

[1] Nous avons vu effectivement que d'après les lois d'Ampère, tome I, page 225, toutes les portions d'un même courant se repoussent, et cette répulsion qui se manifeste sous la forme d'un simple mouvement, quand une partie du courant est mobile, doit pouvoir donner lieu à une séparation ou désagrégation des particules, quand le conducteur, n'étant mobile dans aucune de ses parties, le courant est très-énergique.

dans différents gaz. Ce dernier appareil aurait pu servir, à la rigueur, aux deux usages, mais j'ai préféré en avoir un dans lequel l'arc pût être produit à l'air libre.

Le premier des appareils (fig. 218) se compose d'une rainure portant sur un de ses côtés une division linéaire, dans laquelle

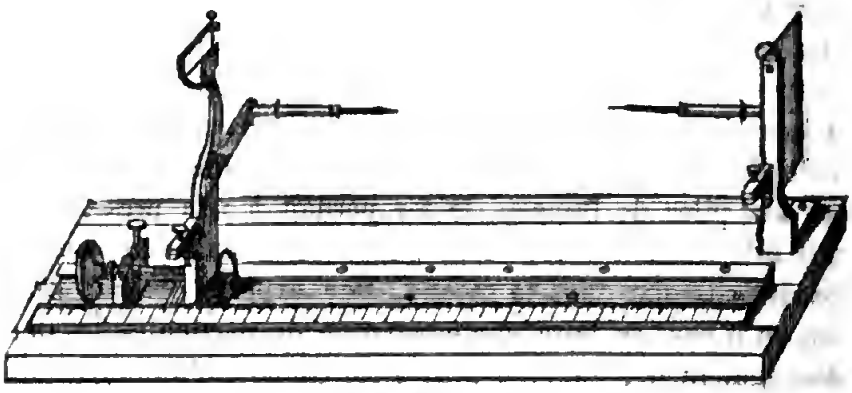


fig. 218

glisse à frottement juste un support métallique qui porte une pince horizontale à laquelle on peut ajuster des pointes conductrices de différente nature; une vis micrométrique permet de mesurer avec beaucoup d'exactitude la quantité dont on fait avancer ou reculer le support, et, par conséquent, la pointe qu'il porte. A l'une des extrémités de la rainure est un support métallique fixe auquel on adapte ou une pointe semblable à la première, ou une plaque conductrice, de façon qu'on peut faire jaillir l'arc ou entre deux pointes, ou entre une pointe et une plaque. Les divisions de la vis micrométrique permettent de mesurer très-exactement la distance entre les deux pointes ou entre la pointe et la plaque, et, par conséquent, la longueur de l'arc. Le second appareil (fig. 219) se compose d'une cloche qu'on place sur la platine d'une pompe pneumatique pour y raréfier l'air et y introduire, si on le veut, un gaz quelconque au moyen du robinet adapté à l'ajustage, qui, situé au haut de la cloche, porte lui-même une boîte à cuir, que traverse une tige métallique à l'extrémité de laquelle est une pince destinée à recevoir une pointe métallique. Cette tige peut être abaissée

ou élevée d'une quantité qu'on mesure très-exactement au moyen d'une division circulaire tracée sur la circonférence d'un disque qui se meut avec la pièce destinée à faire monter ou abaisser la crémaillère dont la tige est munie. Un support métallique fixe est placé au bas de la cloche; il porte ou une pointe verticale ou une plaque horizontale, de manière que l'arc puisse s'établir avec cet appareil comme avec le précédent, ou entre deux pointes, ou entre une pointe et une plaque.

Fig. 219.

Ayant pris pour l'un des électrodes une lame de platine, je me servis successivement pour second électrode, de pointes de différente nature. Avec une pointe de platine l'arc est très-court, surtout si la pointe est l'électrode négatif. Dans l'air raréfié à 3 ou 4 millimètres, on ne pouvait éloigner la pointe de plus d'un millimètre de la plaque sans que l'arc se rompît. L'expérience était faite avec une pile de Grove de 50 couples, faiblement chargée. Avec la même pile fortement chargée, il se formait sur la plaque de platine servant toujours d'électrode positif une tache bleuâtre parfaitement circulaire; elle se reformait également dans l'air sous la pression ordinaire, mais elle avait alors un diamètre moitié moindre. Dans l'hydrogène il ne s'en forme point, preuve que sa production est le résultat d'une oxydation. Quand la lame de platine sert d'électrode négatif, elle se recouvre également d'une tache circulaire, mais cette tache est formée par une foule de petits grains de platine et reste blanche; elle est comme la bleue, beaucoup plus large

dans l'air raréfié que dans l'air ordinaire. Quant à la pointe de platine, elle devient bien vite fortement incandescente quand elle est positive; son extrémité entre en fusion et finit par tomber sur la plaque en y formant un globule parfaitement sphérique, tandis que lorsqu'elle est négative elle s'échauffe peu et ne fond point; par contre, la plaque, qui est alors positive, devient rouge blanc, et risque d'être trouée si elle n'est pas très-épaisse. Quand on remplace la pointe de platine par une pointe de coke, on obtient, la lame restant de platine et positive, un arc d'une longueur double de celui qu'on avait avec la pointe de platine. L'arc lui-même, au lieu d'être comme auparavant, un cône de lumière ayant sa base sur la lame et son sommet à la pointe, se compose d'une foule de jets lumineux partant de différents points de la lame pour aller aboutir à différents points du coke; enfin la chaleur développée sur la plaque de platine est tellement plus considérable, que la plaque est rapidement fondue et trouée. La pile est, dans ces expériences, exactement de même force que lorsque la pointe est de platine au lieu d'être de coke. On voit bien par là l'influence considérable qu'exerce l'électrode négatif, dont le rôle est loin d'être purement passif, puisqu'il suffit de changer sa nature pour modifier d'une manière aussi notable tous les détails du phénomène. Lorsque le coke est positif et la lame de platine négative, l'arc est moins long, surtout dans l'air où il est sensiblement plus court que dans le vide; mais la pointe de coke se réchauffe considérablement et devient rapidement incandescente dans toute son étendue.

En employant successivement comme électrodes le fer, le cuivre, l'argent et l'argentane, on observe, lorsque l'un des électrodes est une pointe et l'autre une plaque du même métal, que la pointe est incandescente dans toute sa longueur si elle est positive, et qu'elle ne se réchauffe qu'à ses extrémités si elle est négative. Quant aux plaques, elles présentent des cavités très-prononcées entourées de cercles colorés, quand elles ont servi d'électrodes positifs dans l'air raréfié. Avec le mercure pris pour un des électrodes, l'effet lumineux est des plus brillants; le mercure est dans un état d'agitation extrême, se soulevant

en forme de cône quand il est positif, et présentant une cavité au-dessous de la pointe positive quand il est négatif.

Un point important à signaler, c'est la différence qui existe dans la température qu'acquièrent les deux pointes entre lesquelles se forme l'arc voltaïque, selon qu'elles sont de même nature ou de nature différente. Lorsqu'elles sont de même nature, c'est toujours la pointe positive qui devient seule incandescente dans toute son étendue; si elles sont de nature différente, c'est la moins conductrice qui s'échauffe, aussi bien quand elle est négative que lorsqu'elle est positive. Ainsi, si la pointe positive est d'argent et la négative de platine, c'est celle-ci qui devient incandescente, et celle d'argent s'échauffe beaucoup moins. Les choses se passent donc comme dans un circuit complétement fermé; ce sont les portions du circuit qui présentent le plus de résistance au courant qui s'échauffent le plus: d'abord la portion qui forme l'arc lui-même, ensuite le métal le moins conducteur. Mais quand de part et d'autre de l'arc les conducteurs sont identiques, le réchauffement, au lieu d'être uniforme, est beaucoup plus considérable pour le côté positif, phénomène qui, rapproché de la désagrégation qui a lieu du même côté, semble indiquer que l'électrode positif éprouve de la part du courant une action beaucoup plus énergique que l'électrode négatif.

M. Matteucci, en faisant plonger pendant un certain temps les deux pointes entre lesquelles l'arc est établi dans des masses d'eau séparées et prises à la même température, a trouvé que la différence de température entre les deux pointes est d'autant plus grande que celles-ci sont formées d'une matière moins conductrice et plus facile à se désagréger. Mais ce qu'il y a d'assez curieux, c'est que dans le gaz hydrogène la différence devient très-petite, ce qui tient probablement à la même cause qui diminue la chaleur d'un fil de platine traversé par le courant quand ce fil est entouré d'hydrogène, c'est-à-dire au pouvoir refroidissant de ce gaz, qui augmente la conductibilité de la partie du circuit qui y est plongée. Du reste, cet échauffement inégal peut avoir lieu par le simple contact des deux conducteurs; seulement la différence est d'autant plus

grande que le contact est moins intime; on la diminue en serrant fortement les deux conducteurs l'un contre l'autre; on l'augmente au contraire, en couvrant l'une des surfaces en contact d'une couche légère d'oxyde, de graphite ou de poussière de charbon; on facilite encore la formation de l'arc en chauffant artificiellement l'électrode positif.

M. Tyrtow, en employant le mercure pour l'un des électrodes, et en se servant pour l'autre de fils de différente nature, a remarqué que toutes les fois que le mercure est négatif et le fil positif, ce dernier rougit et fond quand on met son extrémité en contact avec le mercure, tandis que lorsque le fil est négatif et le mercure positif, au moment du contact on ne voit apparaître que des étincelles bleuâtres, mais le mercure éprouve alors une forte évaporation. Des expériences semblables ont été faites par divers physiciens en remplaçant le mercure par des liquides décomposables; mais alors les effets lumineux et calorifiques se compliquent de phénomènes électro-chimiques; aussi nous en renvoyons l'étude au chapitre suivant.

C'est encore à la différence de température des deux électrodes qu'on doit attribuer l'expérience curieuse de Gassiott, dans laquelle, en mettant en croix deux fils métalliques, de cuivre par exemple, qui communiquent avec les pôles d'une forte pile, on voit le fil positif rougir sur une longueur de 5 à 6 centimètres, en dehors du point de croisement, jusqu'à tomber en fusion, tandis que le négatif n'est incandescent que dans la portion traversée par le courant. Il est évident qu'il y a ici, au point de contact, un commencement de formation d'arc voltaïque, d'autant mieux qu'en éloignant un peu les deux fils l'un de l'autre l'arc apparaît entre eux. Le conducteur positif est donc ici l'électrode positif de l'arc, et en cette qualité il s'échauffe beaucoup plus que le négatif, ce qui fait qu'il est incandescent non-seulement dans la portion qui est parcourue par le courant, mais même en dehors de cette portion sur une petite étendue.

Ainsi que l'a observé M. Matteucci, l'arc se compose en général d'une partie centrale presque cylindrique, dont les bases s'appuient sur les extrémités polaires, et qui brille d'une lumière blanche et très-intense; cette partie est enveloppée d'une matière

lumineuse plus rare, d'une forme sphéroïdale, dont la couleur change avec la nature des pointes d'où émane l'arc et avec celle du milieu qu'il traverse. La partie centrale se compose d'une matière dans laquelle le courant électrique se propage comme dans un conducteur liquide; il suffit pour s'en assurer d'y plonger les fins bouts de deux fils de platine sortant de deux tubes de verre et fixés aux extrémités d'un galvanomètre. Au moment où les fils de platine parviennent à la partie centrale de l'arc lumineux, la déviation de l'aiguille du galvanomètre indique la présence d'un fort courant dérivé. Du reste, il suffit d'introduire un voltamètre dans le circuit de l'arc voltaïque pour s'assurer que le courant s'y propage d'une manière continue. On peut même, par les indications du voltamètre, apprécier la résistance opposée par les arcs produits avec des pointes de différente nature placées à des distances variables. Ainsi, en opérant avec une pile de 60 couples de Grove, on trouve que le courant, par son passage dans le voltamètre pendant 60 secondes, y dégage des quantités de gaz égales à 57, 44 et 38 centimètres cubes pour des distances correspondantes entre les deux pointes de coke de l'arc, à 2, 3 et 4 millimètres. Avec deux pointes d'argent, qui s'altèrent moins promptement que celles de charbon, on obtient 60 centimètres de gaz à 3 millimètres de distance entre les pointes, et 46 centimètres à 6 millimètres de distance. Avec des pointes de métaux différents formant des arcs lumineux de 3 millimètres de longueur, on trouve au voltamètre, en faisant passer le courant pendant 60 secondes, 23 centimètres cubes si les pointes sont en cuivre, 26 si elles sont en laiton, 27 si elles sont en fer, 29 si elles sont en coke, 35 si elles sont en zinc, et 45 si elles sont en étain. Quand les pointes se touchent et qu'on n'a point d'arc, on a 46 centimètres cubes. Il résulte évidemment de là que la conductibilité propre de l'arc dépend moins de la conductibilité des métaux qui forment les pointes que de leur facilité à se fondre et à se désagréger, et par conséquent de la quantité de matière qui disparaît dans l'expérience.

Si l'on place une lame métallique entre les deux pointes de manière qu'elle se trouve au milieu de l'arc, dont on provoque la formation par une étincelle électrique, on remarque que la

partie centrale de la lame commence par entrer en fusion, et des globules s'élancent des deux côtés vers les pointes en même temps que des globules semblables s'élancent des pointes vers la lame; la partie intérieure de l'arc qui lui donne la forme sphéroïdale paraît être produite par la matière encore plus divisée qui résulte de la destruction et de la combustion de ces globules; quand on produit l'arc dans un liquide, on ne voit point cette matière volatisée et divisée, vu qu'elle se répand dans le liquide; on n'aperçoit que la partie centrale, laquelle au contraire est moins distincte avec les pointes de charbon, à cause de leur grande facilité à se désagréger.

Il semblerait que la formation de l'arc résulte des états électriques contraires que possèdent les extrémités polaires avant que le circuit soit fermé, qui peuvent se manifester par une attraction et une étincelle [1], et qui subsistant, l'arc une fois formé, déterminent, à une certaine distance toujours très-petite entre les pointes, une série d'étincelles et une chaîne de matière fondue ou de particules incandescentes détachées des pôles. Ce même phénomène doit bien exister dans toutes les parties du circuit, puisque c'est ainsi qu'a lieu la propagation du courant, mais il produit des effets mécaniques dans les portions de ce circuit, telles que celles où l'arc voltaïque se manifeste, dans lesquelles la résistance est plus grande et la distance des particules plus considérable.

La forme sphéroïdale de l'arc résulte, comme le phénomène qu'on produit avec l'étincelle de la machine dans l'expérience de l'œuf électrique, de la répulsion mutuelle des parties détachées

[1] M. Gassiott avait obtenu, comme nous l'avons vu, avec une pile de 3,500 couples zinc, cuivre et eau des charges électriques assez fortes aux extrémités polaires pour donner pendant plusieurs jours de suite des des étincelles éclatant à $\frac{1}{2}$ millimètre de distance et se succédant très-rapidement. M. Matteucci, en faisant communiquer les pôles d'une pile de Growe de 50 à 60 couples avec deux tiges de laiton portant chacune à leur extrémité une feuille d'or battu, a vu une attraction entre ces feuilles se manifester à quelques centimètres de distance, et si on rapproche beaucoup l'une de l'autre ces deux feuilles rendues très-courtes, on les voit, au moment où l'arc ferme le circuit, s'attirer; en même temps une étincelle éclate, et le plus souvent l'arc lumineux s'établit.

de la même extrémité polaire jointe à l'attraction exercée sur elles par l'autre pôle. On peut même voir, en faisant passer une série d'étincelles entre deux pointes métalliques plongées dans de l'essence de térébenthine qui tient en suspension des particules très-fines de liége ou de charbon, ces particules se grouper entre ces pointes en formant une masse de forme sphéroïdale, composée de filets qui vont d'une pointe à l'autre, et dont chacun est formé par une chaîne de ces molécules entre lesquelles de petites étincelles éclatent. Nous avons déjà vu dans le chapitre premier de cette partie que la distribution des courants dans une masse liquide conductrice semble s'y faire sous forme de filets aboutissant aux deux pôles et formant entre eux un sphéroïde. Nous en verrons de nouvelles preuves quand nous nous occuperons des effets chimiques du courant.

Un phénomène qui est de nature à confirmer ce que nous avons dit sur la nature de l'arc voltaïque est l'influence qu'exerce sur lui le magnétisme. Arago avait soupçonné cette influence immédiatement après la découverte d'Oersted; Davy la constata bientôt après, en approchant un puissant aimant d'un arc voltaïque formé par deux pointes de charbon et long de 3 à 10 centimètres, suivant le degré de raréfaction de l'air ambiant. L'arc, soit colonne lumineuse, était attiré ou repoussé avec un mouvement rotatoire, suivant la position du pôle de l'aimant et la direction du courant. L'action était plus énergique quand l'air, à travers lequel l'arc était produit, était plus raréfié et par conséquent l'arc lui-même plus étendu.

En employant un électro-aimant au lieu d'un aimant, l'effet est beaucoup plus prononcé, et on peut même rompre l'arc en faisant cesser par une attraction ou répulsion trop forte la chaîne des particules qui établissent la communication entre les deux pôles et qui forment le conducteur mobile sur lequel agit la force magnétique. M. Quet, en déterminant un arc voltaïque vertical perpendiculairement entre les deux faces polaires verticales d'un électro-aimant, a vu cet arc se transformer en un dard horizontal, comme celui qu'on produit en soufflant sur une flamme avec un chalumeau. Ce dard peut atteindre une longueur 8 à 10 fois plus grande que l'arc, de 3 à 4 centimètres

par exemple, lorsque celui-ci n'a que 4 millimètres. On voit des particules de charbon être lancées par l'action de l'électro-aimant dans la direction du dard, quand les charbons sont incandescents en deçà des pointes même d'où émane l'arc. Le changement de direction du dard, quand on change le sens du courant ou les pôles de l'électro-aimant, indique bien que cet effet tient à l'action répulsive de l'un des pôles magnétiques combinée avec l'action attractive de l'autre, sur le courant qui est transmis par l'arc. C'est ce que confirme la forme convexe qu'il prend dans le sens du dard, quand les pôles de l'électro-aimant sont trop éloignés pour que le dard lui-même puisse se former. Ajoutons que sa formation est accompagnée d'un bruissement particulier qui dure autant que le dard, et qu'au moment où il cesse, il se produit une détonation très-forte [1].

J'avais observé déjà avant M. Quet ce double bruit dans une étude détaillée que j'avais faite de l'action du magnétisme sur l'arc voltaïque, et j'avais montré qu'il est lié aux modifications moléculaires que cette action apporte à la matière même de cet arc. J'avais remarqué d'abord que, si on place deux tiges de fer doux servant d'électrodes chacune dans une bobine formée d'un gros fil de cuivre, l'arc voltaïque qui a lieu entre ces deux pointes cesse au moment où l'on aimante les tiges de fer en faisant passer un fort courant dans les bobines, et qu'il recommence si on a soin d'interrompre ce courant avant que les pointes se soient refroidies. L'arc lui-même ne peut s'établir entre deux pointes de fer, quand elles sont aimantées qu'autant qu'elles sont beaucoup plus rapprochées, et son apparence est toute différente. Les particules qui se forment semblent ne se détacher qu'avec peine des électrodes; des étincelles jaillissent avec bruit dans toutes les directions, tandis qu'auparavant c'était une lumière très-vive, sans étincelle et sans bruit, accompagnée du transport d'une masse liquide qui s'opérait avec la plus grande facilité. Le phénomène se passe de la même manière, que les deux tiges de fer présentent à celles de leurs extrémités entre lesquelles jaillit l'arc lumineux les mêmes

[1] Cette détonation est souvent très-forte aussi dans les étincelles d'induction, qui sont de véritables arcs voltaïques instantanés.

pôles magnétiques ou des pôles différents. Il faut remarquer encore que l'électrode positif produit, lorsqu'il est fortement aimanté, au moment où l'arc est établi entre lui et un électrode négatif de nature quelconque, un sifflement aigu, tout à fait semblable à celui qu'on fait rendre à la vapeur dans les locomotives; ce bruit cesse immédiatement avec l'aimantation.

Pour mieux étudier ce genre d'effet, il est préférable de se servir d'un fort électro-aimant. C'est ce que j'ai fait en plaçant sur une de ses surfaces polaires une plaque métallique, et au-dessus verticalement une pointe métallique de manière à établir entre elles l'arc voltaïque. La plaque et la pointe étant toutes deux de platine, et la plaque étant positive, on entend, dès que l'électro-aimant est aimanté pendant que l'arc subsiste, un sifflement très-aigu, et il faut rapprocher la pointe de la plaque pour que l'arc puisse continuer. Si la plaque est négative et la pointe positive, l'arc ne peut garder sa position verticale, il est projeté vers les bords de la plaque et aussitôt rompu; sa rupture est, chaque fois qu'elle a lieu, accompagnée d'un bruit sec et instantané, semblable à la décharge d'une bouteille de Leyde.

On observe les mêmes effets en employant une plaque et une pointe d'un métal quelconque, pourvu que la plaque et la pointe soient du même métal, et que celui-ci ne soit pas trop fusible. Le cuivre et surtout l'argent offrent une particularité remarquable, c'est que la plaque conserve à sa surface l'empreinte de l'action qu'elle a éprouvée sous l'influence de l'électro-aimant. Ainsi, quand elle est positive, la portion de la surface qui se trouve au-dessous de la pointe négative présente une tache en forme d'hélice qui semble indiquer que le métal fondu dans cette portion a éprouvé un mouvement giratoire autour d'un centre, en même temps qu'il est soulevé en forme de cône. La courbe en hélice est en outre dans toute sa longueur bordée de petites ramifications parfaitement semblables aux aigrettes que déterminent les traces de l'électricité positive qui sort du bouton d'une bouteille de Leyde. Quand la plaque est négative et la pointe positive, les traces sont toutes différentes; c'est un cercle d'un très-petit diamètre d'où part une ligne plus ou moins courbe qui forme comme une espèce de queue à la

comète dont le petit cercle serait le noyau; la direction de la queue dépend du sens dans lequel l'arc a été projeté.

En produisant l'arc entre deux pointes très-près de l'électro-aimant, entre ses deux pôles par exemple, on peut facilement déterminer soit le sifflement aigu, soit la série des détonations; celles-ci sont même quelquefois assez fortes pour ressembler de loin à des décharges de mousqueterie; seulement il faut que l'électro-aimant soit très-puissant et le courant qui produit l'arc très-intense. Avec une pointe de platine et une pointe de cuivre on obtient le sifflement, quand c'est le platine qui est positif, et des détonations quand c'est le cuivre. Cela tient à ce que le platine s'échauffe beaucoup plus que le cuivre, quand il est positif. Il est facile de s'assurer que pour obtenir le sifflement il faut que l'électrode positif atteigne une température capable de lui faire éprouver un commencement de liquéfaction; sans cela on n'a que les détonations; c'est ce que m'ont prouvé de nombreuses expériences faites avec différents métaux. Il faut avoir la précaution, pour obtenir le sifflement, de maintenir autant que possible l'arc continu une fois que l'électrode positif est bien incandescent, tandis que pour avoir les détonations il faut tenir l'un des électrodes à la main, et établir et interrompre fréquemment l'arc en évitant que la température des pointes ne s'élève trop. Ces résultats semblent nous montrer que le sifflement est dû au transport de la matière plus ou moins liquéfiée de l'électrode positif, tandis que les détonations proviennent de l'arrachement de ces mêmes particules, quand la substance qui est désagrégée n'est pas fortement chauffée. Mais ce qu'il y a d'assez extraordinaire, c'est que ce sifflement et ces détonations n'aient lieu que lorsque l'arc est sous l'action de l'aimant. Serait-ce simplement l'effet de l'action attractive ou répulsive des courants de l'aimant sur la série des particules qui, formant l'arc, constituent un conducteur plus ou moins mobile traversé par le courant? Serait-ce le résultat d'une modification apportée par l'influence de l'électro-aimant à la constitution moléculaire des électrodes? Je suis plutôt disposé à croire que sous l'influence puissante de l'électro-aimant les molécules qui transmettent le courant, en formant la chaîne électrique, prennent des positions

forcées dues à l'action électro-dynamique, et que le sifflement est le résultat de cette gêne imprimée aux molécules qui sortent des électrodes, tandis que la détonation est l'effet de leur retour à leur état d'équilibre moléculaire. Les expériences suivantes me paraissent de nature à corroborer cette opinion, en même temps qu'elles semblent confirmer les idées que nous avons émises dans le chapitre précédent sur le mode de propagation du courant électrique.

Si l'on place dans la direction axiale ou équatoriale ou intermédiaire, au-dessus des pôles d'un électro-aimant fortement aimanté, des barreaux prismatiques d'étain, de zinc, de plomb et de bismuth de 2 centimètres d'équarissage et de 50 de longueur environ, et qu'on les fasse traverser par un courant discontinu provenant d'une pile de 5 à 10 couples de Grove, on entend très-distinctement un son composé d'une série de coups correspondants aux interruptions du courant. Ils ne rendent aucun son perceptible tant que l'électro-aimant n'est pas aimanté. On produit le même effet avec des tiges de cuivre, d'argent et de platine. Des tubes de tous ces mêmes métaux rendent des sons encore plus prononcés que des cylindres pleins; des fils roulés en hélice autour d'un cylindre de bois vibrent également; un fil de plomb disposé de cette manière peut rendre en particulier un son très-fort. Un aimant ordinaire produit le même effet qu'un électro-aimant. Il en est de même d'une hélice traversée par un fort courant continu dans l'axe de laquelle on place le barreau, le tube ou le fil à travers lesquels on transmet le courant discontinu. Avec une double hélice formée de deux gros fils de cuivre recouverts de soie et enroulés l'un extérieurement à l'autre, on a un son d'une intensité remarquable en faisant passer le courant continu à travers le fil extérieur et le discontinu à travers l'intérieur; dans le cas inverse le son est beaucoup plus faible, ce qui tient à ce que l'action magnétique d'un courant en hélice est presque nulle extérieurement, tandis qu'elle est très-énergique intérieurement.

Les effets que nous venons de décrire ne peuvent pas être attribués à une dilatation provenant d'un réchauffement opéré par le courant, puisqu'il a lieu avec des conducteurs de trop

forte dimension et un courant trop faible pour qu'on puisse admettre qu'il y ait la moindre élévation de température. D'ailleurs le son n'est produit qu'autant que l'électro-aimant agit en même temps que le courant est transmis. On ne peut non plus admettre que la production du son soit le résultat d'une flexion mécanique occasionnée par l'action attractive ou répulsive de l'électro-aimant sur le conducteur traversé par le courant; les dimensions de ce conducteur excluent cette interprétation qui ne saurait se concilier non plus avec le fait que des corps aussi peu élastiques que le plomb et le charbon végétal bien recuit donnent lieu au même phénomène, ainsi également qu'une colonne de mercure renfermée dans un tube de verre de 2 ½ centimètres de diamètre et de 26 de longueur [1]. Tous ces phénomènes me paraissent être le résultat de l'action de l'électro-aimant sur les petits arcs voltaïques qui ont lieu de molécules à molécules, dans l'intérieur d'un corps conducteur traversé par un courant électrique. Quand l'électro-aimant agit sur tous les arcs voltaïques visibles, il n'est pas nécessaire, pour que le son soit produit, de rendre le courant discontinu, parce qu'il l'est déjà par lui-même, l'arc étant formé d'une série de décharges qui se succèdent plus ou moins rapidement. Il n'en est pas de même quand le courant traverse de bons conducteurs tels que des tiges métalliques; il faut alors le rendre discontinu pour que les particules aient le temps de reprendre leur position naturelle entre le passage de deux courants successifs, et puissent acquérir ainsi un mouvement oscillatoire autour de cette position; condition nécessaire pour que l'action de l'électro-aimant détermine un son et qui se trouve naturellement remplie avec l'arc voltaïque lumineux.

En résumé, le mouvement oscillatoire, et la production du son qui en est la conséquence, me paraît être un phénomène moléculaire provenant de la lutte qui s'établit entre la position que

[1] Quand le mercure est placé dans une auge découverte, en même temps qu'on entend un son, on voit à sa surface un mouvement vibratoire particulier très-différent du mouvement giratoire qu'il manifeste sous l'influence des pôles d'un aimant, quand il est traversé par un courant continu.

l'action de l'aimant tend à imprimer aux molécules qui forment la chaîne électrique, et celle que ces particules possèdent naturellement. Cette lutte, très-apparente aux yeux aussi bien qu'à l'oreille, quand elle a lieu dans les particules qui composent l'arc lumineux, ne devient sensible que par le son quand il s'agit des arcs moléculaires ou des décharges qui ont lieu de particules à particules. Mais ce n'en est pas moins, à la grandeur près, un phénomène analogue; ce qui confirme, comme nous l'avons déjà remarqué, l'idée que nous avons mise en avant que la propagation du courant se fait dans les conducteurs par une série de décharges de molécules à molécules semblables à celles qui s'opèrent à des distances finies entre deux conducteurs, et que nous venons d'étudier sous le nom d'arcs voltaïques.

§ 8. Considérations générales sur la chaleur et la lumière électriques. — Propriétés spéciales de cette lumière.

L'étude que nous venons de faire de l'étincelle électrique et de l'arc voltaïque nous a démontré que, sous ces deux formes, la production de la lumière et de la chaleur par l'électricité est liée d'une manière remarquable à un mouvement des particules des corps. D'un autre côté, les recherches récentes de Joule, de Clausius et de Thomson ont conduit les physiciens à envisager la chaleur comme résultant d'un mouvement rotatoire des particules autour d'un axe, et nous avons nous-même considéré cette hypothèse comme propre à rendre compte de la polarité des atomes[1]. Ne serait-il donc pas possible que la cause de la chaleur, et par conséquent de la lumière, qu'engendre la réunion des deux électricités s'opérant sous forme de décharge ou de courant, ne fût pas dans le fait même de cette réunion, mais dans une augmentation du mouvement moléculaire qui résulterait de la transmission de l'électricité? Ce mouvement, il est vrai, n'est pas apparent dans le phénomène du réchauffement et de l'incandescence des bons conducteurs tels que des fils métalliques, comme il l'est dans l'étincelle et dans l'arc vol-

[1] Tome I, page 570.

taïque. Toutefois, il se manifeste même dans ce cas par les modifications moléculaires qu'éprouvent les fils qui ont été rendus incandescents par l'effet des décharges[1]. Au reste, il nous semble que la meilleure preuve en faveur de l'existence de ce mouvement, indépendamment de la production même de la chaleur, existe dans le fait général des sons que rendent et par conséquent des vibrations qu'éprouvent tous les conducteurs qui transmettent des courants discontinus, lorsqu'ils sont placés sous l'influence de puissants électro-aimants.

Quant à la théorie qui attribue d'une manière directe à la réunion même des deux électricités le dégagement de la chaleur et de la lumière, nous trouvons une objection contre sa généralité dans le fait important découvert par Peltier, constaté et étudié par plusieurs autres physiciens, que cette réunion produit quelquefois un abaissement de température. Peltier avait démontré cette propriété curieuse du courant en plaçant dans l'intérieur de la boule d'un thermoscope à air, au lieu d'un fil de platine comme dans l'appareil de Riess (fig. 195, page 156), une tige de 2 à 3 millimètres de diamètre composée de deux petits cylindres, l'un de bismuth, l'autre d'antimoine, appliqués bout à bout l'un contre l'autre, de façon que leur surface de contact fût à peu près au centre de la boule. Il avait trouvé qu'un courant électrique d'un seul couple transmis à travers la

[1] Une expérience qui semblait devoir démontrer que la chaleur dégagée par le courant est due à un mouvement ayant une certaine direction, était celle par laquelle on avait tenté de faire passer à la fois à travers un même fil métallique, en sens contraire l'un de l'autre, deux courants énergiques de même intensité, et capables chacun séparément de faire rougir ce fil. On trouvait qu'alors le fil restait parfaitement froid, preuve, croyait-on, que les deux mouvements dirigés en sens opposé se neutralisent. Mais il est facile de voir que dans ce mode d'opérer, le fil, au lieu d'être traversé par deux courants opposés, n'est traversé par aucun. En effet, l'expérience se réduit à ceci, savoir que lorsque deux piles sont réunies par leurs pôles opposés de manière à former un circuit complet, un fil métallique qui unit les deux conducteurs établissant les communications entre les pôles n'est traversé par aucun courant, ce qui doit être, puisque c'est à peine si un faible courant dérivé devrait être transmis par ce fil. L'expérience n'est donc nullement concluante en faveur de l'existence d'un mouvement moléculaire, mais elle ne lui est pas contraire.

tige abaissait la température du point de contact de 37 divisions, quand il marchait du bismuth à l'antimoine, et l'élevait de 45 environ, quand il cheminait de l'antimoine au bismuth. Lenz remarque avec raison que l'effet du refroidissement est diminué dans la manière d'opérer de Peltier, par le réchauffement que le passage du courant détermine dans le barreau même de bismuth, ainsi qu'il s'en est assuré. Pour se mettre à l'abri de cet inconvénient, il a soudé l'un à la suite de l'autre deux barreaux quadrangulaires de bismuth et d'antimoine de 11 $\frac{1}{2}$ centimètres de longueur chacun, et de 2 $\frac{1}{2}$ centimètres carrés de section transversale, puis il a percé au point de la soudure un trou dans lequel il a introduit la boule d'un petit thermomètre, en ayant soin de remplir entièrement de limaille de fer la partie supérieure du trou resté vide. En faisant passer à travers ce bâton métallique le courant d'un simple couple de zinc et de platine d'environ 10 décimètres carrés de surface, il a trouvé que le thermomètre s'abaissait de 4° centig., quand le courant allait du bismuth à l'antimoine, et qu'il s'élevait au contraire de plusieurs degrés, quand le courant cheminait de l'antimoine au bismuth. Ayant rempli d'eau le trou de la soudure et ayant recouvert le bâton, sauf au point de soudure, de neige fondante de manière que la température de tout l'appareil, l'eau comprise, fût maintenue à 0°, il réussit à faire geler l'eau renfermée dans le trou et même à abaisser sa température à 4°, 5, en faisant passer le courant du bismuth à l'antimoine pendant cinq minutes. Sans le passage du courant l'eau ne gelait point, et sa température se maintenait seulement à 0°.

Le phénomène curieux que nous venons de signaler se rattache à un fait plus général, savoir, la variation de température que détermine le passage d'un courant électrique au point de contact de deux conducteurs hétérogènes soudés bout à bout. M. Peltier a observé que pour la plupart des métaux l'élévation de température est toujours beaucoup plus grande au point de contact de deux fils métalliques, quand le courant passe du moins conducteur au plus conducteur, que dans le cas inverse; et la différence peut devenir telle que dans certains cas, au lieu d'une élévation de température, on ait un abaissement comme

nous l'avons remarqué; mais alors deux conditions sont nécessaires pour obtenir ce dernier phénomène : la première, que l'un des métaux au moins soit cristallin; la seconde, que le courant transmis ait une faible intensité.

M. Frankenheim, qui a fait une étude approfondie de ces phénomènes, distingue avec raison cette variation de température qui a lieu à la limite de deux conducteurs, et qu'il nomme *secondaire*, de celle qui a lieu dans tout le circuit. La première dépend du sens du courant, tandis que la seconde en est indépendante; elle est proportionnelle à la simple intensité du courant, tandis que la seconde est proportionnelle au carré de cette intensité.

Du reste, les effets observés pour la première fois par Peltier sont liés avec un phénomène que nous n'avons point encore étudié, celui de la production des courants thermo-électriques, qu'on développe en chauffant et refroidissant alternativement les points de contact de petites tiges métalliques hétérogènes soudées bout à bout les unes à la suite des autres, de manière à former un circuit tout métallique. En effet, en réchauffant le point de contact d'un barreau d'antimoine et d'un barreau de bismuth, on détermine un courant qui va directement du bismuth à l'antimoine, et en le refroidissant on obtient un courant qui va également directement de l'antimoine au bismuth, c'est-à-dire que le courant produit par ces variations de température a une direction précisément contraire à celle du courant qui produirait ces mêmes variations. Cette opposition semble donc indiquer que le courant extérieur qu'on introduit dans la tige composée des deux métaux y produit un mouvement moléculaire dirigé en sens contraire de celui que la chaleur y détermine, d'où résulte l'abaissement de température qu'il est si difficile d'expliquer autrement. Mais ce n'est que dans la cinquième partie consacrée aux sources de l'électricité, et en particulier dans le chapitre où nous traiterons plus spécialement du développement de l'électricité par la chaleur, que nous pourrons revenir, en l'étudiant d'une manière plus approfondie, sur le phénomène que nous venons de signaler, et qui a été l'objet des travaux d'un grand nombre de physiciens. Ce que nous en

avons dit suffit cependant pour justifier la double assertion que nous avons émise plus haut, savoir, que la chaleur dégagée par la transmission de l'électricité dynamique n'est pas due à la réunion des deux électricités, mais qu'elle doit plutôt être attribuée à un mouvement moléculaire dont cette réunion détermine la production, ou simplement l'augmentation. Dès lors on conçoit que dans le cas des corps cristallisés, où les molécules sont retenues par des forces qui ne leur permettent pas de prendre immédiatement sous l'influence du courant une position qui mette en harmonie le sens de leur rotation naturelle avec celui de la rotation que le courant tend à leur imprimer, ces deux sens puissent être contraires de telle façon que le passage du courant contrecarre le mouvement, et que loin d'accroître la vitesse, il la diminue; ce qui, d'après les théories actuelles sur la chaleur, abaisse la température au lieu de l'élever. Il n'en est plus de même quand le courant, devenant plus fort, les forces moléculaires doivent lui céder, et ne s'opposent plus à ce que les particules prennent la position qu'il tend à leur imprimer, position qu'elles occupent sans lutte dans les corps non cristallisés et dans les liquides.

Ces mouvements moléculaires, qui sont si perceptibles dans l'arc voltaïque, n'en existent pas moins dans l'étincelle, quoiqu'ils y soient moins sensibles. Nous en avons vu la preuve dans le transport des particules qu'opère l'étincelle et dans la formation des anneaux de Priestley. Aussi l'étincelle électrique est le résultat comme l'arc d'un mouvement très-rapide imprimé aux particules matérielles, et qui est accompagné d'une forte chaleur et de lumière; mais sa durée excessivement courte rend la perception de ces phénomènes beaucoup plus difficile que dans l'arc qui est permanent. La lumière de l'étincelle n'est-elle due qu'à l'incandescence des petites particules solides détachées du conducteur et des molécules gazeuses ambiantes, ou bien proviendrait-elle en partie aussi d'un ébranlement imprimé directement à l'éther par le mouvement de l'électricité? Il me paraît difficile d'admettre que l'électricité puisse agir directement sur l'éther, de manière à y produire des ondulations lumineuses, car il n'y a pas de lumière électrique dans le vide parfait, sauf

celle qui provient de l'incandescence des particules détachées des conducteurs par la décharge; et cette lumière se montre toujours partout où il y a des particules matérielles dans un espace qui n'en renferme que peu. Ainsi, dans le long tube où l'on a fait le vide, on voit la lueur électrique se promener le long de la paroi intérieure du tube de verre à laquelle il reste toujours de l'air ou de la vapeur adhérents. J'ai réussi même à montrer d'une manière frappante la présence d'une substance pondérable là où il y a lumière électrique, jusque dans le vide en apparence le plus parfait. Voici la description d'une expérience qui, quoique faite en vue de l'explication des aurores boréales, comme on le verra plus tard, constate bien le principe bue je viens de poser.

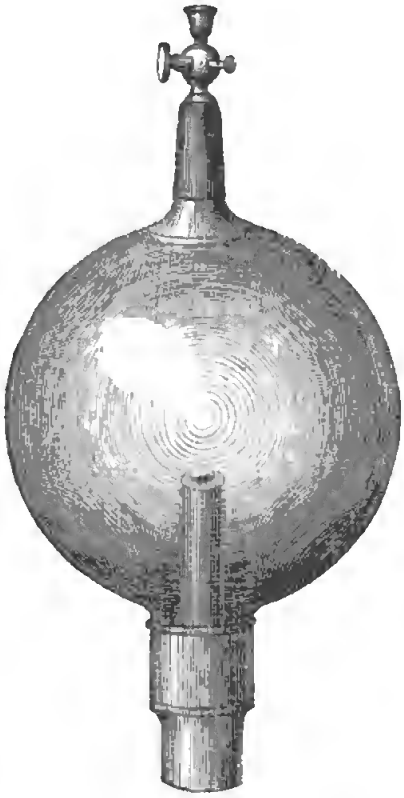


Fig. 220.

J'introduis dans un ballon de verre de 30 à 40 centimètres

de diamètre (fig. 220), par une des deux tubulures opposées dont il est muni, une tige de fer doux de 2 centimètres de diamètre environ, de façon que l'une de ses extrémités aboutisse à peu près au centre du ballon, et que l'autre ressorte par la tubulure et la dépasse. La tige de fer est recouverte, dans toute son étendue, sauf à ses deux extrémités, d'une couche isolante très-épaisse, formée d'abord de gomme laque, puis d'un tube de verre recouvert lui-même de gomme laque, puis d'un second tube de verre, et enfin d'une couche de cire bien unie; la couche isolante doit avoir, dans son ensemble, au moins un centimètre d'épaisseur, ce qui donne 4 centimètres de diamètre au barreau ainsi recouvert. Un anneau de cuivre entoure le barreau par dessus la couche isolante dans la portion la plus rapprochée de la tubulure, mais dans l'intérieur du ballon. Cet anneau peut être mis en communication avec une source électrique extérieure au barreau, au moyen d'un fil métallique isolé avec soin, qui traverse la tubulure et se termine extérieurement par un crochet. Un robinet, fixé à la seconde tubulure du ballon, permet d'y faire le vide. Lorsque l'air y est suffisamment raréfié, on fait communiquer le crochet avec le conducteur d'une machine électrique, et l'extrémité extérieure de la tige de fer doux avec le sol, de façon que l'électricité forme dans l'intérieur du ballon une gerbe lumineuse plus ou moins irrégulière, qui part de l'anneau et aboutit à l'extrémité supérieure du fer doux. Mais, au moment où l'on place l'extrémité extérieure de ce fer sur le pôle d'un fort électro-aimant, la lumière électrique prend un aspect tout différent. Au lieu de partir indifféremment de différents points de la surface supérieure du cylindre de fer, elle part uniquement de tous les points de la circonférence de cette surface, de manière à former autour d'elle comme un anneau lumineux continu. Ce n'est pas tout; cet anneau a un mouvement de rotation autour du cylindre aimanté, tantôt dans un sens, tantôt dans un autre, suivant la direction du courant électrique et le sens de l'aimantation. Enfin, des jets plus brillants semblent partir de cette circonférence lumineuse sans se confondre avec le reste de la gerbe. Dès que l'aimantation cesse, le phénomène lumineux

redevient ce qu'il était auparavant, et ce qu'il est généralement dans l'expérience connue sous le nom de l'œuf électrique.

N'est-il pas évident que ces jets lumineux, qui obéissent comme des conducteurs mobiles à l'action de l'aimant, sont, dans ce cas, aussi bien que dans celui de l'arc voltaïque, composés de particules matérielles traversées par la décharge. Je suis disposé à admettre que ces particules sont gazeuses et qu'elles proviennent de la couche d'air restée adhérente, malgré le vide, à la surface supérieure du cylindre de fer d'où sort le jet électrique qui les entraîne avec lui de manière à former l'aigrette qui, ainsi que nous l'avons vu, est composée de petits filets d'air. D'ailleurs la lumière violacée de ces filets gazeux traversés par la décharge diffère notablement de la lumière blanche et bien plus vive des particules solides détachées des conducteurs, qui se trouvent en plus ou moins grande proportion au milieu de la lueur électrique. Il existe, entre ces deux apparences, à peu près la même différence qu'on observe entre la lumière pâle de la flamme de l'hydrogène pur ou de l'alcool, et celle de cette même flamme quand on y introduit de petites particules de charbon, ou une lame mince de platine, qui deviennent incandescentes.

Toutefois, M. Neef, qui a fait une étude particulière de la lumière électrique, est disposé à croire que la lueur de couleur bleuâtre qui se manifeste autour des conducteurs chargés d'électricité provient d'une espèce d'atmosphère gazeuse dont tout métal, à l'état solide, est entouré, et que l'électricité rend visible là où elle agit avec le plus d'intensité. La présence de cette atmosphère métallique expliquerait les changements de couleur qu'éprouve la lumière avec la nature des métaux entre lesquels jaillit l'étincelle d'induction. M. Neef l'a observée avec le zinc qui donne une lumière bleue, et le cuivre qui en donne une verte. M. Matteucci a fait la même observation avec des pointes de zinc, de cuivre et d'or. Cependant M. Neef reconnaît qu'avec de l'électricité de frottement, qui a beaucoup plus de tension, l'air et les fluides élastiques peuvent devenir lumineux, ce qui explique pourquoi les divers gaz produisent une lumière de couleur différente. Il est bien probable qu'il en est de même

avec la lumière de l'étincelle d'induction, et que les différences que présente sa couleur, suivant les métaux entre lesquels elle éclate, tiennent au mélange des particules métalliques incandescentes avec les particules gazeuses également lumineuses.

Nous avons déjà parlé, dans le § 6, du travail intéressant de Neef, qui a appliqué le premier avec succès le microscope à l'étude des phénomènes lumineux de l'électricité en examinant avec soin, avec le secours de cet instrument, toutes les particularités de l'étincelle d'induction. Ce physicien avait cru devoir distinguer les deux pôles quant à leurs propriétés calorifique et lumineuse, attribuant au pôle positif le dégagement de la chaleur, la réduction en poussière et la volatisation de la substance de l'électrode, et au pôle négatif la production de la lumière primaire, c'est-à-dire de la lumière qui ne provient pas d'un accroissement de température. L'existence de cette lumière, qu'il nomme *flammes froides*, paraît à M. Neef très-distincte de celle qui résulte de l'incandescence et de la combustion des particules solides détachées des électrodes, et il la considère comme étant de même nature que la lumière phosphorique qui ne semble pas également douée de chaleur; cette lumière est donc, suivant lui, indépendante de la chaleur, tandis que la lumière secondaire est due à la chaleur qui, provenant du pôle positif, produit l'incandescence et transporte au pôle négatif des particules de l'électrode positif, quand elle acquiert un certain degré d'intensité; la chaleur et la lumière se confondent alors, mais non dans leur origine. C'est en diminuant suffisamment l'intensité de l'étincelle d'induction qu'on parvient à ne plus avoir de lumière qu'à l'électrode négatif, et pour cela M. Neef se sert d'une petite rondelle et d'une pointe de platine entre lesquelles il fait jaillir cette étincelle au moyen d'un appareil semblable à celui de la figure 149[1], dont il peut diminuer la force à volonté[2]. Selon que le courant d'induction a l'une ou l'autre direction, c'est tantôt la pointe, tantôt la

[1] Tome I, page 393.

[2] Le moyen le plus simple de faire varier l'intensité du courant d'induction, est de mettre dans son circuit une petite colonne d'eau placée dans un tube dans lequel pénètrent deux pointes métalliques qu'on peut rapprocher plus ou moins,

rondelle qui s'illumine d'une lumière violette, tandis que l'électrode opposé reste obscur. Riess, comme nous l'avons vu, a montré que le phénomène lumineux de Neef est analogue à celui de la décharge obscure de Faraday, et qu'on peut également le produire au moyen d'un fort courant d'induction transmis dans l'air raréfié entre deux boules, dont l'une, la négative, est lumineuse, et l'autre, la positive, reste obscure. Il a fait voir qu'avec une raréfaction moindre le pôle positif devient aussi lumineux, ce qui prouve que le dégagement de lumière n'est point une propriété exclusive du pôle négatif.

L'idée de Neef de lier le dégagement de lumière et de chaleur à la nature de la polarité, négative ou positive, ne nous paraît donc pas fondée, d'autant mieux qu'il n'y a plus de polarité dès qu'il y a décharge ou courant et que la chaleur et la lumière ne sont développées qu'autant qu'il y a électricité en mouvement. Toutefois, il y a deux faits bien démontrés : le premier, que dès qu'il y a transmission d'une décharge ou d'un courant électrique à travers un mauvais conducteur, l'électrode positif éprouve une augmentation de température et une désagrégation mécanique que n'éprouve pas au même degré le négatif; le second, que l'émission de la lumière n'est pas toujours identique aux deux électrodes, et que, suivant les circonstances qui accompagnent la transmission de l'électricité, elle est plus forte à l'électrode positif ou au négatif. Je suis disposé à croire que ces différences tiennent essentiellement à la nature du milieu interposé entre les électrodes, ainsi qu'à la nature et la forme des électrodes eux-mêmes, ainsi que cela résulte des expériences faites avec l'arc voltaïque. Peut-être aussi, dans certains cas, les altérations chimiques qu'éprouve le milieu traversé par l'électricité ne sont-elles pas complétement étrangères à ces effets. Mais avant d'en rechercher davantage l'explication, essayons d'étudier mieux que nous ne l'avons fait la lumière électrique elle-même, ses propriétés spéciales et ses effets; nous trouverons dans cette étude un moyen d'en mieux approfon-

et de manière que le trajet du courant à travers l'eau soit plus ou moins long; c'est cet appareil qu'on appelle *modérateur*.

dir la nature et d'en mieux expliquer les diverses apparences.

Bien vite après la découverte de l'arc voltaïque on avait remarqué que, tant sous le rapport de l'intensité que sous celui de ses autres propriétés, cette lumière avait beaucoup de ressemblance avec la lumière solaire. Brande avait montré qu'elle détermine immédiatement la combinaison du chlore et de l'hydrogène; j'avais observé moi-même qu'on peut obtenir une empreinte au daguerréotype d'un buste en plâtre éclairé par cette lumière. J'avais également constaté qu'elle ne présente aucune trace de polarisation, autre analogie avec les rayons du soleil. Plus tard, MM. Fizeau et Foucault, en comparant les deux lumières, soit entre elles, soit avec celle qui est produite par les gaz oxygène et hydrogène projetés sur de la chaux, avaient confirmé cette analogie; car ils avaient trouvé que, tant sous le rapport de leur action chimique sur une plaque iodurée de daguerréotype que sous celui de leur simple action lumineuse appréciée par la comparaison des images reçues sur un écran translucide, l'intensité de la lumière des pointes de charbon produite par 46 couples de Bunzen est à celle de la lumière solaire comme 1 : 4, et même comme 1 : 2,5 avec trois séries parallèles, soit 46 couples à surface triple, tandis que l'intensité de la lumière des gaz oxygène et hydrogène est à celle de la lumière voltaïque comme 1 : 35 ou comme 1 : 56 avec les 46 couples à grande surface. On voit donc combien la lumière électrique est plus rapprochée de la lumière solaire que de celle qui est produite par la combustion du mélange gazeux. Une chose assez remarquable, c'est qu'on arrive au même résultat, soit pour les intensités optiques, soit pour les intensités chimiques, ce qui prouve que ces deux intensités sont dans le même rapport. Je dois ajouter que la lumière voltaïque soumise à l'expérience était fournie par l'extrémité de l'électrode positif, qui paraît être la portion la plus brillante de l'arc formé par deux pointes de charbon. M. Despretz, dans ses recherches sur l'arc voltaïque, a bien constaté que, si l'arc croît en longueur avec le nombre des couples disposés en série, l'intensité de sa lumière, passé une certaine limite, ne suit pas la même progression, mais augmente avec la surface. Ainsi, au delà de 100 couples, l'in-

tensité ne s'accroît pas sensiblement si on augmente même jusqu'à 600 le nombre des couples en série, tandis que l'arc devient 6 à 7 fois plus long; mais si on dispose ces 600 couples en six séries parallèles de manière à avoir 100 couples à grande surface, alors l'intensité de la lumière croît presque proportionnellement à cette surface.

Casselmann, en opérant avec des pointes de charbon préparées comme le charbon des piles de Bunzen, mais qui avaient été plongées dans une solution, soit de nitrate de strontiane, soit d'acide nitrique, etc., avait trouvé que ces pointes produisent une lumière beaucoup plus égale et plus permanente que celle qu'on obtient avec du charbon pur; seulement elle est diversement colorée, suivant la nature de la solution dans laquelle les pointes de charbon ont été plongées.

Voici un tableau qui renferme le degré d'intensité de la lumière pour chaque arc, avec la force du courant correspondant, mesuré au moyen d'un galvanomètre à tangente placé dans le même circuit dont l'arc fait partie. L'intensité lumineuse est rapportée à celle d'une bougie de stéarine prise pour unité.

	DISTANCE des POINTES.	FORCE du COURANT.	INTENSITÉ de la LUMIÈRE.
Charbon pur.	0mm.5	95	932
	4 .5	68	139
Charbon plongé dans le nitrate de strontiane.	0 .5	120	353
	6 .75	88	274
Charbon plongé dans le chlorure de zinc.	1 .0	80	624
	5 .0	67	129
Charbon avec borax dans l'acide sulfurique.	1 .5	72	1171
	5 .0	64	165

Ces résultats ne sont qu'approximatifs à cause de la mobilité de la lumière des extrémités incandescentes des pointes qui contribuent pour la plus grande partie à la vive lumière de l'arc. Cependant, réunis à d'autres dans lesquels la lumière avait été rendue plus fixe au moyen de l'action d'un aimant qui lui don-

nait une direction déterminée, on trouve que l'intensité lumineuse croît dans une progression un peu plus rapide que la force du courant.

M. Masson, qui a fait une étude toute particulière de la lumière électrique, s'est principalement occupé de celle que manifeste l'étincelle; il la produisait dans ses expériences par les décharges d'un condensateur à lames de verre recouvertes sur chacune de leurs faces d'une feuille mince d'étain. L'instrument destiné à ces expériences, et qu'il a nommé *photomètre électrique*, est construit d'après le principe suivant : Un disque de papier sur lequel on a tracé des secteurs noirs et blancs d'égale dimension, se mouvant avec une rapidité suffisante, paraît d'une teinte uniforme et grisâtre si on l'éclaire avec une lumière blanche permanente. Ce phénomène bien connu est dû à la persistance de la sensation. Lorsqu'au lieu d'une lumière fixe on emploie une lumière instantanée pour éclairer les secteurs, on voit le disque comme s'il était fixe, les secteurs n'ayant pu se déplacer sensiblement pendant la durée de la lumière. L'œil apercevant dans ce cas, et avec une grande netteté, tous les détails du disque, nous acquérons déjà une notiou sur son extrême sensibilité et sur la rapidité avec laquelle s'exerce la perception des objets et se forme notre jugement sur leur nature. Si le disque éclairé par une lumière permanente est subitement illuminé par une lumière instantanée, une étincelle électrique par exemple, on verra, pour une intensité convenable de cette dernière, apparaître les secteurs. Si l'on affaiblit successivement la lumière instantanée, il arrivera une époque où les secteurs disparaîtront, et le disque paraîtra éclairé d'une teinte uniforme. Dans ce cas la lumière instantanée est une fraction de la lumière permanente, variable avec l'œil de l'opérateur, mais invariable pour un même œil, les circonstances de vision restant les mêmes. En effet, à cause de la persistance de la sensation, la place qu'occupe un secteur noir, ne réfléchissant pas la lumière de l'étincelle, a conservé l'éclairement primitif du fond; celle qu'occupe un secteur blanc renvoie à l'œil autant de lumière que la première, plus la lumière due à l'étincelle. Quand l'intensité de cette dernière représentera la limite

de sensibilité de l'œil de l'observateur, le disque paraîtra uniformément éclairé. Le rapport entre les intensités des éclairements des secteurs noirs et blancs au moment où l'on cesse de les distinguer, peut, comme nous le verrons plus loin, varier de $\frac{1}{50}$ à $\frac{1}{120}$, suivant la sensibilité de l'œil de l'observateur. Quant au rapport entre l'intensité de la lumière de l'étincelle et celle de la lumière fixe, il dépend des dimensions des secteurs noirs et blancs. Si les secteurs sont égaux, et c'est le cas de ces expériences, le rapport entre la lumière instantanée et la lumière fixe est la moitié de celui trouvé par expérience. En effet, supposons que la sensibilité de l'œil soit $\frac{1}{60}$; quand les secteurs disparaissent, le rapport entre la lumière électrique et la lumière fixe n'est que $\frac{1}{120}$ de l'éclairement que produirait la lumière fixe sur un disque parfaitement blanc, puisque le disque en mouvement ne nous envoie que la moitié de la lumière qu'il réfléchirait s'il était en repos et parfaitement blanc. L'intensité de la lumière électrique donnée par expérience ne serait que $\frac{1}{180}$ de la lumière fixe, si la surface noire était les deux tiers de la surface blanche.

Les appareils nécessaires aux expériences sont une machine

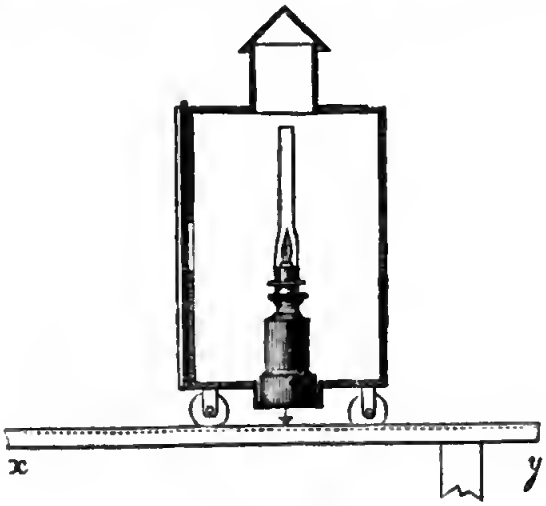


Fig. 221.

électrique, des condensateurs, un micromètre destiné à mesurer les distances explosives de l'étincelle, des conducteurs d'une

forme et d'une nature particulières, l'appareil destiné à renfermer la lumière permanente, enfin le photomètre. Les condensateurs sont plans et formés de lames de verre, recouvertes sur chacune de leurs faces d'une feuille mince d'étain, ce qui permet de mesurer facilement leur surface et leur épaisseur, et d'apprécier leur degré d'homogénéité. La lumière fixe est produite par une très-bonne lampe carcel dont l'éclairement peut être rendu constant pendant une ou deux heures. La lampe (fig. 221) est renfermée dans une boîte en bois noircie, semblable à celle des fantasmagories, et ce système se meut sur un chemin à rainure munid'une division en millimètres qui, au moyen de la pointe verticale correspondant au centre de la flamme, mesure sa distance au disque éclairé. L'appareil photométrique est essentiellement constitué par un disque de papier épais (fig. 222) de 8 centimètres de diamètre sur lequel on a tracé soixante secteurs noirs et blancs alternatifs et de même dimension; le disque est collé sur un support de cuivre fixé par une douille à l'axe principal d'un mouvement d'horlogerie contenu dans une boîte; à l'aide d'une détente, on peut arrêter ou faire mouvoir le disque dont la vitesse variable peut atteindre un maximum de 200 à 250 tours par seconde.

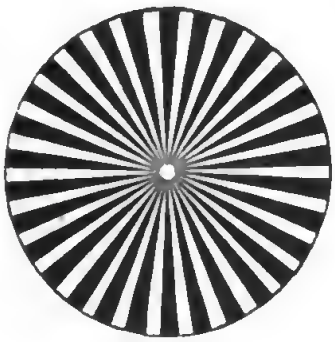


Fig. 222.

L'appareil en son entier est représenté en projection verticale (fig. 223); M N est la paroi qui sépare la chambre obscure où est l'appareil, de la chambre dans laquelle est la machine électrique et le condensateur dont la décharge arrive par les conducteurs en laiton V et V′, maintenus au centre des tubes de verre K H et K′ H′ par des bouchons de liége recouverts d'une couche isolante. Les armures des condensateurs communiquent par les conducteurs métalliques V G et V′ G′ à des colonnes de mercure contenues dans des rigoles L L et L′ L′ creusées dans des cylindres de bois et vernies intérieurement avec de la cire d'Espagne noire. Ces conducteurs, comme tous les autres

accessoires de l'appareil placé dans la chambre noire, sont recouverts d'un vernis d'un noir mat, de manière à éviter toute

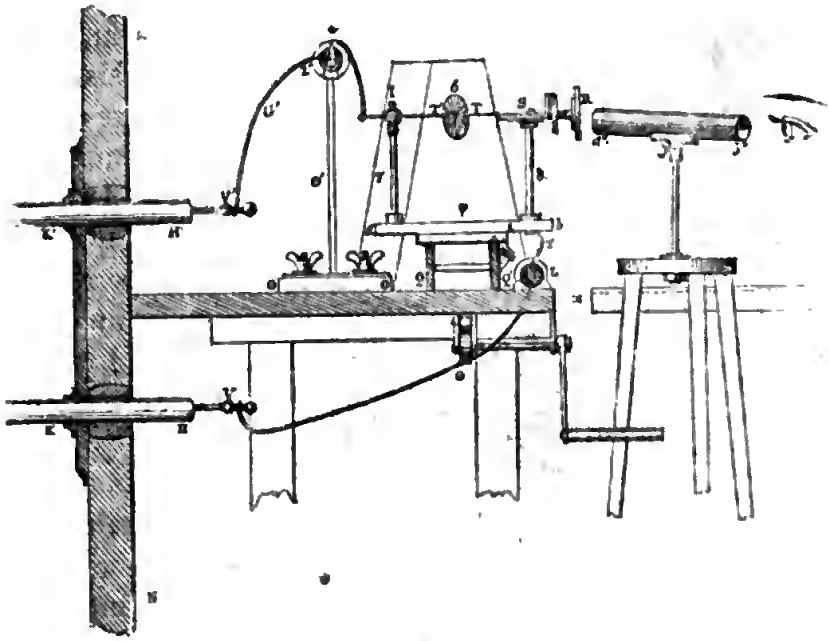


Fig. 223.

réflexion. Les tiges V G, V′ G′, amalgamées sur tous les points plongeant dans le mercure, aboutissent aux extrémités opposées des canaux L L, L′ L′, *de telle sorte que le circuit parcouru par le courant reste constant.* Le cylindre L′ L′ est isolé sur des pieds de verre recouverts d'une couche de gomme laque noircie; L L est fixé au support qui reçoit l'appareil où jaillit l'étincelle. Ce support en bois, construit comme la pièce fixe d'une machine à raboter, est désigné par les lettres Q Q; il est placé sur une table solidement fixée au mur et au plancher; il porte sur une de ses faces une division en millimètres qu'on ne voit pas, parce qu'elle est tracée sur une tige horizontale et perpendiculaire au plan de la figure. L'appareil qui est le siége de l'étincelle est mobile sur Q Q′ et peut être amené, au moyen d'une chaîne sans fin à la Vaucanson, et d'une manivelle, à diverses distances du photomètre. La pièce portant l'étincelle est composée d'une planche *a b*, supportant deux tiges verticales, l'une en verre *a* γ, et l'autre en cuivre *b* ε. En I est inva-

riablement fixé, par une vis de pression, un conducteur métallique plongeant en ω dans le mercure; ce conducteur est terminé en T′ par une boule montée à vis. Un autre conducteur T S, portant aussi une boule vissée T, est mis en mouvement au moyen d'une vis micrométrique R S donnant le demi-millimètre. La communication avec le sol est établie par le conducteur ƨ *b* Y L, dont la partie Y L plonge dans la rigole de mercure L L. Les supports *o o*, fixés sur la table par des vis de pression, portent une rainure qui permet d'établir le parallélisme entre les rigoles L et L′. Le centre du disque, celui de la flamme de la lampe et l'étincelle électrique sont contenus dans un même plan horizontal. L'œil de l'observateur regarde le disque au travers d'un tube noirci intérieurement et extérieurement ayant son axe perpendiculaire au plan du disque; ce tube renferme les diaphragmes qui ne permettent à l'œil d'apercevoir que les secteurs. La lampe carcel avec sa boîte est placée derrière l'œil de l'observateur, de manière à éclairer le disque sur le support horizontal où se meut, le long de la division, la boîte qui la renferme.

Après divers essais préliminaires qui lui prouvèrent l'exactitude et la sensibilité de son appareil, M. Masson trouva que l'intensité de la lumière électrique produite par des décharges dépendait des éléments suivants : 1° la distance d'explosion; 2° la surface des condensateurs; 3° l'épaisseur des condensateurs; 4° la nature et par conséquent la puissance condensante des condensateurs; 5° la conductibilité du circuit; 6° la nature du milieu où l'explosion est produite; 7° la nature des pôles, soit électrodes entre lesquels l'étincelle jaillit. Il établit de plus les lois suivantes :

PREMIÈRE LOI. *L'intensité de la lumière électrique varie en raison inverse du carré des distances de cette lumière aux surfaces éclairées.*

DEUXIÈME LOI. *L'intensité de la lumière électrique varie proportionnellement aux surfaces des condensateurs et en raison inverse de leur épaisseur.*

TROISIÈME LOI. *L'intensité de la lumière électrique croît proportionnellement aux carrés des distances d'explosion.*

Ces lois sont générales et indépendantes des autres éléments qui n'influent que sur l'intensité absolue de la lumière électrique. Il est assez remarquable qu'en comparant les résultats de M. Masson à ceux de Riess on trouve que les mêmes lois régissent le développement de la lumière et celui de la chaleur, de telle sorte que les mêmes formules leur sont applicables, et qu'on peut poser comme principe que *les quantités de chaleur sont proportionnelles aux quantités de lumière*[1].

Nous ne pouvons rapporter ici les détails des nombreuses expériences au moyen desquelles M. Masson a obtenu les lois que nous venons d'énoncer, non plus que celles qu'il a faites pour étudier l'influence de la conductibilité du circuit, et la portée explosive des différentes substances gazeuses et liquides[2]. Nous nous bornerons à transcrire deux des tableaux qui renferment les résultats relatifs à l'influence exercée sur l'intensité de la lumière électrique par la nature des électrodes, ce qui donnera en même temps l'idée de la manière dont l'habile physicien français opérait dans ses recherches.

Il employait successivement pour électrodes des boules de métal de différente nature, ayant environ 4 millimètres de diamètre ; à chaque changement de métal on déterminait la position du vernier correspondant au contact des sphères, en rapprochant les boules jusqu'à ce qu'on vît disparaître entre elles une petite étincelle produite par la machine électrique, puis désignant par X la distance d'explosion, par Y celle de l'étincelle au photomètre, et par Z celle de la lampe, on obtient les résultats renfermés dans les deux tableaux suivants, dont le premier donne X, Z et Y étant constants, et le second Y, X et Z étant constants. Dans les deux séries d'expériences, la surface du condensateur est de 40,000 millimètres carrés.

[1] Voyez la note finale D.

[2] Nous avons déjà traité ce point au chapitre Ier, p. 95 et suiv.

$Z = 540^{mm}$ $Y = 634^{mm}$.

MÉTAUX.	X.			MOYENNE.
Fer.	5mm.45	5mm.50	5mm.50	5mm.48
Cuivre.	5 .29	5 .24	5 .30	5 .27
Laiton.	5 .26	5 .20	5 .18	5 .21
Etain.	4 .88	4 .90	4 .89	4 .89
Zinc.	4 .89	4 .86	4 .87	4 .87
Plomb.	4 .20	4 .13	4 .12	4 .15

$Z = 540^{mm}$ $X = 6^{mm}$.

MÉTAUX.	Y.			MOYENNE.
Cuivre.	7mm.53	7mm.52	7mm.52	7mm.52
Laiton.	7 .56	7 .57	7 .56	7 .56
Fer.	7 .64	7 .59	7 .61	7 .61
Étain.	7 .82	7 .84	7 .83	7 .83
Plomb.	7 .94	7 .99	7 .96	7 .96
Zinc.	7 .98	7 .96	7 .97	7 .97

En classant les métaux d'après l'accroissement qu'ils peuvent produire dans l'intensité de l'étincelle, on obtient l'ordre suivant :

Premier tableau.	Deuxième tableau.
Fer.	Cuivre.
Cuivre.	Laiton.
Laiton.	Fer.
Étain.	Étain.
Zinc.	Plomb.
Plomb.	Zinc.

On voit, d'après ce classement, que les métaux forment deux groupes distincts entre lesquels il existe une différence d'action très-notable, tandis qu'elle est très-légère entre les métaux du même groupe. Ces deux groupes comprennent : l'un, le cuivre,

le fer et le laiton, et l'autre, l'étain, le zinc et le plomb. Or, ce classement est le même que celui qu'on obtiendrait en ayant égard à la ténacité de ces métaux, ceux qui ont le moins de ténacité donnant une lumière plus vive que ceux qui en ont plus. Comme d'un autre côté l'inspection à la loupe des boules qui ont servi à la production de nombreuses étincelles montre qu'elles sont profondément altérées aux points d'explosion, surtout celles d'étain, de zinc et de plomb, on est forcément conduit à reconnaître que le phénomène lumineux tient à des effets d'arrachement qui varient avec la ténacité des métaux et non avec leur fusibilité, puisque des métaux ayant des points de fusion très-différents donnent au photomètre la même intensité[1]. Au reste, cet ordre est aussi celui que M. Matteucci avait trouvé en classant les métaux d'après la conductibilité de l'arc auquel ils donnent naissance. Des expériences faites successivement avec des boules de laiton dont les surfaces étaient polies ou dépolies, étamées ou amalgamées, en démontrant que c'est la surface du métal et non sa conductibilité propre qui exerce une influence sur l'intensité de la lumière, confirment que cette intensité augmente lorsque les métaux sont facilement transportés par la décharge. Mais il est probable aussi, comme nous le verrons dans l'instant, que la nature même des particules transportées contribue pour sa part à l'effet observé.

Cette influence de la nature des particules est surtout sensible quand on étudie les spectres formés par le passage, à travers un prisme, de la lumière des étincelles électriques. Déjà Wollaston et surtout Frauenhofer avaient trouvé que le spectre de la lumière électrique diffère de celui des autres lumières artificielles et de la lumière solaire par la présence de plusieurs raies très-claires, dont une en particulier qui se trouve dans le vert est d'une clarté presque brillante en comparaison du reste du spectre. M. Wheatstone, ayant étudié le phénomène en se servant pour électrodes de différents métaux, avait remarqué que les

[1] M. Riess avait déjà montré que l'effet de pulvérisation qu'éprouvent également les métaux par les décharges ne dépend point d'une fusion, mais est le résultat direct d'une désagrégation moléculaire opérée par le passage de l'électricité, laquelle doit nécessairement, dans les mêmes circonstances, varier avec la ténacité.

raies brillantes diffèrent en nombre et en position suivant le métal employé, et que, lorsque l'étincelle part entre des boules de métaux différents ou faites d'alliages divers, on aperçoit simultanément les raies brillantes appartenant à chacun des deux métaux. Le savant physicien anglais avait opéré avec la lumière électrique produite, soit par les piles, soit par les machines d'induction, soit par les machines électriques ordinaires. M. Despretz et M. Foucault ont fait plus tard un examen plus complet du spectre de l'arc voltaïque. Le premier a trouvé que les raies brillantes de l'arc produit entre deux pointes de charbon sont fixes et indépendantes de l'intensité du courant; car il s'est assuré qu'en passant de 100 éléments à 600 disposés, soit consécutivement, soit en séries parallèles de 100, une raie jaune ou bleue amenée en coïncidence avec le fil de la lunette reste parfaitement à la même place. Le second physicien, M. Foucault, ayant observé dans ce même spectre une ligne double située sur la limite du jaune et de l'orangé, rappelant par sa forme et sa situation la raie D du spectre solaire, voulut savoir si elle lui correspondait, et pour cela il fit tomber sur l'arc lui-même une image solaire formée par une lentille convergente, ce qui lui permit d'observer, superposés l'un à l'autre, le spectre électrique et le spectre solaire; il s'assura ainsi que la double ligne brillante de l'arc coïncidait avec la double ligne noire de la lumière solaire. On retrouve cette raie D dans les arcs formés par d'autres matières, et quand on emploie comme électrodes des métaux qui ne la font apparaître que difficilement, tels que le fer et le cuivre, on peut la faire revivre avec une grande intensité en les touchant avec la potasse ou la soude. En faisant concourir les spectres des divers arcs avec celui de la lumière solaire, on trouve que les raies possèdent toutes les nuances que leur assigne leur réfrangibilité; mais ce qu'il y a de plus frappant, c'est que parmi ces raies il en est qui possèdent une intensité absolue énormément supérieure à celle du rayon solaire correspondant. Ainsi, dans l'arc de l'argent, on trouve une raie verte d'un éclat éblouissant, véritable source de lumière simple et qu'on peut rendre aussi intense que l'on veut.

Le physicien qui a étudié avec le plus de soin et de la ma-

nière la plus complète les spectres de la lumière électrique est encore M. Masson, qui s'est servi, pour cette étude, soit de la lumière de l'étincelle produite par la décharge des condensateurs, soit de celle de l'arc voltaïque. Il a trouvé dans le spectre de l'étincelle électrique dégagée dans l'air toutes les couleurs du spectre solaire[1], et il s'est assuré que les raies brillantes qui le sillonnent sont bien de la même couleur que la partie du spectre de la même réfrangibilité, quoique quelquefois, lorsqu'elles ont trop d'éclat, elles apparaissent comme de la lumière blanche sur un fond coloré. Du reste, en augmentant l'intensité de l'étincelle, on rend bien les raies plus brillantes et plus vives, mais on ne change ni leur position, ni leur nombre, ainsi que M. Despretz et M. Foucault l'avaient déjà remarqué pour les raies du spectre de l'arc. On peut également, par un accroissement d'intensité, étendre le violet qui est toujours le plus faible dans le spectre de la lumière électrique, mais on ne peut jamais étendre le spectre du côté du rouge; propriété semblable à celle que M. Matthiessen a reconnue dans le spectre de la lumière solaire, avec laquelle, comme on le voit, soit par cet exemple, soit par ce qui précède, la lumière électrique a une grande ressemblance.

La partie la plus importante des recherches de M. Masson est celle qui concerne les modifications qu'éprouve la distribution des raies quand on change la nature des métaux entre lesquels s'échappe l'étincelle. Il a constaté que ces raies diffèrent en nombre et en intensité, mais qu'il y a cependant un certain nombre de *raies communes*, c'est-à-dire qui demeurent les mêmes dans tous les spectres, ce qui indique la mesure de leur déviation qui est partout semblable, tandis que les déviations des autres sont très-différentes. Les valeurs de ces déviations ont été déterminées avec soin par M. Masson pour un très-grand nombre de raies dans les spectres produits par l'étincelle dans les cas où les électrodes étaient faits des substances suivantes : *charbon*, *cadmium*, *antimoine*, *bismuth*,

[1] Il a également constaté, comme je l'avais déjà fait, mais d'une manière plus complète, que la lumière de l'arc même ne présente jamais aucune trace de polarisation.

Charbon.

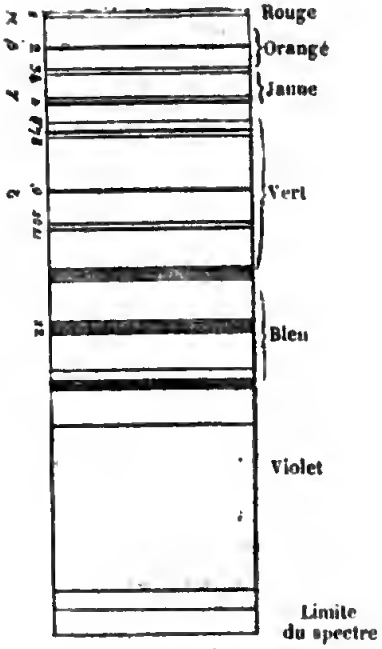


Fig. 224.

Cadmium.

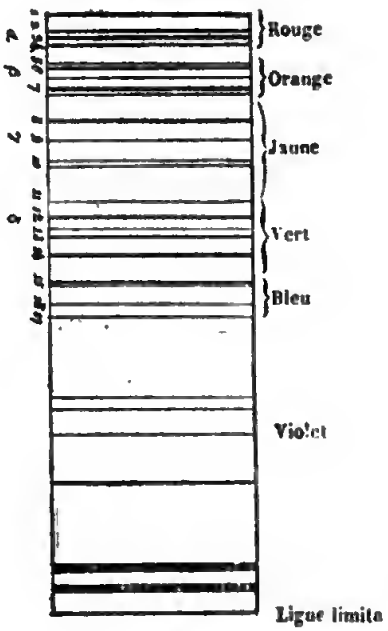


Fig. 225.

Antimoine.

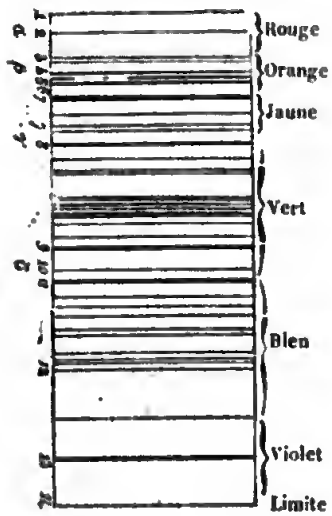


Fig. 226.

Zinc.

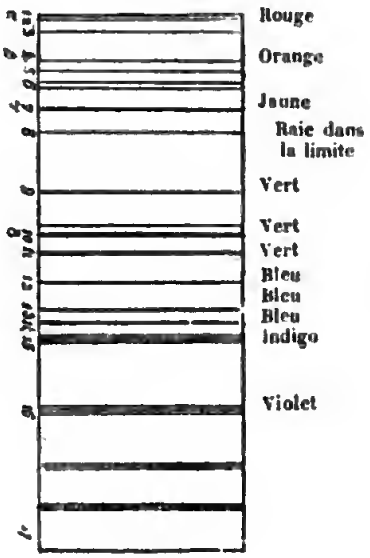


Fig. 227.

plomb, étain, fer et cuivre. Ces nombres pourront peut-être une fois servir à établir le rôle propre de la nature des particules

dans la production de la lumière; pour le moment ils démontrent, par le seul fait qu'ils diffèrent les uns des autres, l'existence de ce rôle. Nous ne les rapporterons pas ici; nous nous contenterons de quelques remarques. Le charbon (fig. 224) donne dans le violet beaucoup de raies très-brillantes, mais très-fines; à la fin du violet elles sont séparées par des intervalles absolument obscurs, vu la faiblesse de la lumière. Le cadmium (fig. 225) est de tous les métaux essayés celui qui donne le spectre le plus beau et le plus net; il est surtout remarquable par des raies vertes et bleues très-brillantes. Le spectre de l'antimoine (fig. 226) est sillonné par une multitude de raies très-brillantes, beaucoup plus nombreuses que dans le spectre des autres métaux. Celui du zinc (fig. 227) contient un vert pomme très-caractérisé; il est assez curieux qu'il diffère autant de celui du cadmium. Le cuivre donne un spectre remarquable par le nombre des raies fines et brillantes du bleu et du violet; ceux de l'étain et du fer, du bismuth et du plomb, ne présentent rien de particulier, sauf l'étendue du violet et le nombre des raies assez confuses que renferme cette couleur.

Au lieu de l'étincelle, on peut employer comme lumière électrique celle qui est produite dans l'arc voltaïque, et on obtient avec les électrodes de différente nature des spectres parfaitement semblables à ceux que donne l'étincelle dans chaque cas. Si la pile dont on fait usage est passablement forte (50 à 100 couples de Bunzen), on a des spectres magnifiques qui se projettent sur des écrans, comme le spectre solaire avec lequel ils rivalisent d'éclat. Seulement, pour faire ces expériences, il faut donner à la lumière de l'arc voltaïque une fixité qu'elle n'a pas naturellement. Dans ce but on fait usage d'un appareil qui, au moyen de la combinaison d'une force mécanique et de l'attraction exercée par un électro-aimant sur une pièce de fer doux liée au système, rapproche les pointes qui servent d'électrodes dès qu'elles sont trop éloignées pour que l'arc puisse s'établir entre elles, sans cependant leur permettre de venir en contact, ce qui le ferait disparaître.

Plusieurs physiciens ont imaginé et construit des appareils fondés sur ce principe; dans le nombre de ces appareils, celui

de M. Duboscq nous paraît l'un des plus satisfaisants ; il est destiné essentiellement à produire l'arc entre deux pointes

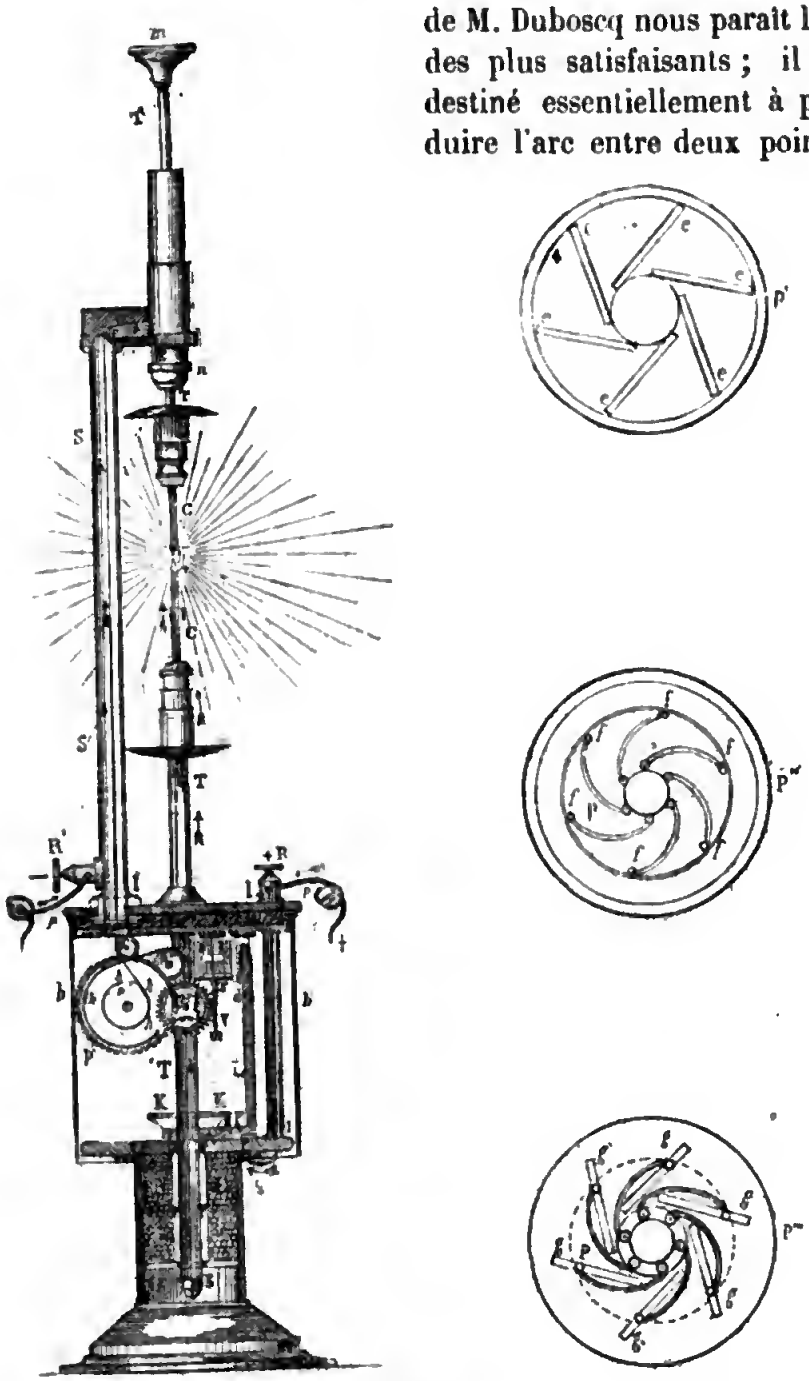


Fig. 228.

de charbon, mais il s'adapte également bien à la production des arcs produits avec des électrodes d'une nature quelconque.

Voici en quelques mots sa description (fig. 228). Les deux charbons entre lesquels jaillit la lumière brûlent au contact de l'air, se raccourcissent à chaque instant; il faut en conséquence un mécanisme qui les rapproche l'un de l'autre proportionnellement aux progrès de la combustion; et comme le charbon positif subit une usure plus rapide que le négatif, il doit marcher plus rapidement au-devant de ce dernier, et cela dans un rapport qui varie avec la grosseur ou la nature du charbon. Le mécanisme doit satisfaire à toutes ces exigences. Les deux charbons sont sans cesse sollicités l'un vers l'autre; le charbon inférieur, par un ressort en spirale qui le fait monter, et le charbon supérieur, par son poids qui le fait descendre. Le même axe leur est commun.

Le courant galvanique est produit par une pile de Bunzen, de 40 à 50 éléments; il arrive aux deux charbons en passant, comme dans les appareils déjà connus, par un électro-aimant creux et caché dans la colonne de l'instrument. Quand les deux charbons sont en contact, le circuit est fermé, l'électro-aimant attire un fer doux placé à l'extrémité d'un levier qui enraye une vis sans fin. Un ressort antagoniste tend toujours à faire dérayer la vis aussitôt qu'un écart se produit entre les deux charbons; s'il est un peu considérable le courant ne passe plus, l'action du ressort redevient prédominante, la vis est dérayée, et les charbons se rapprochent jusqu'à ce que, le courant recommençant à passer entre les deux charbons, le mouvement qui les entraînait l'un vers l'autre se ralentit en raison du retour de la prédominance de l'électricité sur le ressort; la combustion des charbons augmente de nouveau leur écartement, et, avec lui, l'action supérieure du ressort : d'où résulte de nouveau la prédominance du ressort, et ainsi de suite. Ce sont des alternatives d'action et de réaction, dans lesquelles tantôt le ressort l'emporte, tantôt l'électricité. Sur un axe commun aux deux charbons sont deux poulies; l'une, dont on peut varier le diamètre à volonté, communique par un cordon avec la tige qui porte le charbon inférieur, lequel répond au pôle positif de la pile; l'autre, à diamètre invariable, est en rapport avec le charbon supérieur ou négatif. Le diamètre de la

poulie, susceptible de varier proportionnellement à l'usure du charbon avec lequel elle communique, peut être augmenté de 3 à 5. Cette disposition a pour objet de conserver le point lumineux à un niveau convenable, quelle que soit la grosseur ou la nature des charbons. Il faut seulement savoir qu'à chaque changement d'espèce ou de volume de charbon on doit faire varier le diamètre de la poulie. Cette variation résulte de celle d'un tambour mobile communiquant avec six leviers articulés près du centre de la sphère; l'extrémité mobile des six bras de levier porte une petite goupille qui glisse dans des fentes cylindriques. Ces fentes sont obliques par rapport à la sphère; elles forment des plans inclinés. Un ressort en spirale appuie toujours sur l'extrémité des leviers, de sorte que si l'on tourne les plans inclinés vers la droite, les six leviers se replient vers le centre et diminuent le diamètre. Si, au contraire, on tourne vers la gauche, le diamètre augmente, et, avec lui, la vitesse de translation du charbon qui communique avec la poulie (voyez P′, P″ et P‴, fig. 228). Notons en passant que cet appareil s'adapte merveilleusement à la reproduction de toutes les expériences d'optique, même les plus délicates, et qu'il remplace à cet égard avantageusement la lumière solaire. Nous aurons du reste occasion d'en reparler en nous occupant des applications de l'électricité, en particulier de l'éclairage.

Dans les expériences faites avec l'arc voltaïque, le spectre ne présente aucune raie brillante quand la lumière émane de la partie solide du charbon en incandescence. Ce résultat est d'accord avec celui qu'on obtient en chauffant jusqu'au rouge-blanc un fil de platine dont le spectre n'offre également aucune raie brillante[1]. On n'en remarque non plus aucune dans les spectres provenant de la lumière d'un arc voltaïque produit entre deux pointes de charbon plongées soit dans l'eau pure, soit dans l'essence de térébenthine, soit dans l'alcool;

[1] Cette absence de raies dans ce cas, constatée par M. Masson, résultait déjà implicitement de recherches fort intéressantes de M. Draper, sur les intensités lumineuses et calorifiques d'un fil de platine progressivement échauffé par le courant.

mais si on prend pour électrodes dans l'alcool des boules de laiton au lieu des pointes de charbon, le spectre présente de magnifiques raies brillantes; on remarque alors que le métal a été fondu, puisque le tiers des boules a disparu et que le liquide a été rempli d'une matière noire qui est probablement de l'oxyde du métal très-divisé, tandis que, quand les électrodes sont de charbon, le liquide conserve sa transparence, ce qui prouve qu'il n'y a pas eu de transport de particules, d'où résulte qu'il n'y a pas eu de raies. Cette absence de transport est très-sensible dans l'alcool où l'on peut maintenir pendant longtemps la même intensité lumineuse en conservant la même distance aux charbons. Ajoutons que le spectre de la lumière provenant de l'étincelle électrique produite dans les liquides ne présente pas non plus de raies brillantes; peut-être avec des décharges plus fortes, qui produiraient un transport de la matière des électrodes, en obtiendrait-on.

Il serait très-intéressant d'étudier l'influence exercée sur le spectre de la lumière de l'étincelle électrique par un changement dans la nature ou dans la densité du milieu gazeux où elle est produite, influence qui, comme nous l'avons vu, est si grande sur la forme et la couleur de cette étincelle. M. Masson, qui a aussi fait quelques expériences sur ce point particulier, a trouvé que la raréfaction de l'air diminue l'intensité des couleurs de manière à les faire presque disparaître, mais qu'elle ne change rien ni au nombre, ni à la position des raies brillantes qui paraissent plus faibles, il est vrai, sur un fond absolument obscur.

Dans l'hydrogène, le spectre de l'étincelle présente les mêmes apparences que dans l'air raréfié. On ne distingue pas les couleurs du spectre, et sur un fond obscur on aperçoit des raies brillantes très-faibles. On sait que l'étincelle elle-même dans l'hydrogène a une lumière rouge-pourpre très-faible, absolument semblable à celle qu'on obtient dans l'air raréfié. Cependant, si l'on veut obtenir l'étincelle dans l'hydrogène, il faut, pour une même distance explosive, la même quantité d'électricité que dans l'air sous la même pression, et la décharge a la même intensité dans les deux cas. La différence dans les deux lu-

mières, qui fait que celle de l'hydrogène devient semblable à celle de l'air raréfié, ne peut donc tenir qu'à ce que les molécules de l'hydrogène donnent une lumière moins vive que celles de l'air sous l'action de la même décharge, et à ce que les particules détachées de l'électrode éprouvent une incandescence moins forte dans le premier gaz que dans le second [1].

L'étude détaillée que nous venons de faire de la lumière électrique confirme tout ce que nous avons dit sur le mode de propagation de l'électricité, en avançant qu'il ne peut avoir lieu que par l'intermédiaire de la matière pondérable. Masson s'est assuré en effet que le vide barométrique ne peut conduire un courant ou une décharge à moins que la tension de l'électricité ne soit considérable, c'est-à-dire qu'elle soit suffisante pour détacher des électrodes des particules très-divisées. Quant à la lumière, elle est produite par un courant ou une décharge qui, se propageant par l'intermédiaire de la matière pondérable, l'échauffe de la même manière, et suivant les mêmes lois qu'un courant voltaïque échauffe et rend lumineux des fils métalliques. L'état des corps (solide, liquide ou gazeux) ne modifie en rien les lois générales de l'action électro-dynamique; c'est ce que Savary avait déjà démontré en obtenant exactement le même degré d'aimantation pour des aiguilles d'acier placées les unes au-dessus d'un tube où l'on avait fait le vide de Boyle, les autres au-dessus d'un conducteur métallique du même diamètre que le tube, faisant l'un et l'autre partie d'un même circuit traversé par une décharge.

Quant à la lumière elle-même, elle possède toujours les mêmes propriétés, quels que soient les moyens employés pour la produire, et tous les phénomènes que nous venons d'étudier nous confirment dans l'opinion qu'elle résulte bien de l'incandescence des particules du milieu que traverse la décharge ou le courant électrique, et de celle des particules qui sont détachées des électrodes dont la présence détermine les raies du

[1] Il y a évidemment des particules détachées dans l'hydrogène comme dans l'air raréfié, puisque le spectre présente des raies aussi bien dans l'un que dans l'autre.

Digitized by Google

spectre qui varie avec leur nature. Il serait intéressant d'étudier avec soin la chaleur qui accompagne cette lumière dans les divers cas où elle est produite. Nous avons vu que dans le cas de l'arc voltaïque où le transport des particules incandescentes est considérable et continu, la température est très-élevée. Mais quand il s'agit de l'étincelle, E. Becquerel a démontré que la chaleur rayonnante est nulle ou très-faible, ce qui tient surtout à son peu de durée, car on sait qu'elle a cependant un pouvoir calorifique assez fort pour déterminer la combinaison des gaz, de l'hydrogène et de l'oxygène par exemple, quand on la transmet entre deux pointes de platine dans un endiomètre rempli d'un mélange détonnant. Mais dans ce cas même, il faut que la décharge soit assez puissante pour détacher et entraîner des particules des pointes métalliques entre lesquelles elle a lieu, ainsi que l'indique la lumière vive et blanche de l'étincelle, et que le prouve l'état des pointes quand elles ont servi quelque temps aux expériences. Autrement les simples lueurs qui résultent de l'incandescence seulement du milieu gazeux ne dégagent pas de chaleur rayonnante sensible, quoique avec des appareils très-délicats on doive nécessairement en percevoir un peu.

La lumière électrique jouit encore d'une propriété remarquable, savoir, d'exciter la phosphorescence dans les corps qui en sont susceptibles. Cette propriété est indépendante de celle que possède la décharge de produire le même effet. En effet, si on introduit des fragments de coquilles d'huître calcinées dans de petits tubes de verre fermés hermétiquement et placés eux-mêmes dans d'autres tubes plus larges, et qu'on fasse passer un grand nombre de décharges électriques sur la surface extérieure de ces tubes, les fragments deviennent phosphorescents en les chauffant; la lumière de l'arc voltaïque produit le même phénomène, mais à un moindre degré. L'effet en est dû à la lumière électrique et non à l'influence directe de l'électricité, puisqu'en enfermant la même substance phosphorique dans des tubes de verre rouge, jaune et bleu foncé, Seeheck a remarqué qu'au moment où les trois tubes sont exposés à la lumière de la décharge,

il n'y a que la substance qui est dans le tube bleu qui devienne lumineuse, ce qui prouve que le verre bleu est celui qui laisse passer les rayons phosphogéniques de la lumière électrique, comme il laisse passer ceux de la lumière solaire. MM. Becquerel et Biot ont fait un très-grand nombre d'expériences pour étudier l'influence de divers écrans sur la transmission de la radiation provenant de l'étincelle, qui produit la phosphorescence, et ils ont trouvé qu'elle était très-distincte de la radiation lumineuse. Il en est de même de la phosphorescence produite par les rayons solaires, et ceux de ces rayons qui les produisent sont les plus réfrangibles du spectre, tandis que les autres, tels que les rouges, non-seulement ne la produisent pas, mais même la détruisent. Les rayons phosphogéniques de la lumière solaire et ceux de la lumière électrique, sont donc à peu près les mêmes, et probablement aussi les mêmes que les rayons chimiques. La propriété phosphogénique de la lumière électrique est donc entièrement liée avec sa propriété chimique que nous avons déjà constatée, et il ne faut nullement la confondre avec la propriété que possède l'électricité agissant directement sur les corps, de les rendre phosphorescents ou de troubler leur état chimique.

Au reste, la lumière des corps phosphorescents a tellement de rapport dans ses différentes teintes et dans son intensité avec la lumière que développe l'électricité dans certains cas, qu'il est bien difficile de ne pas lui reconnaître une identité d'origine. La phosphorescence est donc très-probablement une lueur résultant de petites décharges électriques qui s'opèrent à travers l'air adhérent à la surface des corps doués de cette propriété; et ce qui rend cette hypothèse plus probable, c'est que, outre la similitude d'apparence, on remarque que tous les moyens et toutes les circonstances qui produisent et favorisent le développement de la phosphorescence, sont les mêmes qui produisent et favorisent le dégagement de l'électricité, comme nous aurons occasion de le voir quand nous étudierons les sources de l'électricité; et c'est surtout que le procédé le plus propre à rendre les corps phosphorescents est de les faire traverser par une décharge électrique, et par conséquent de leur donner

directement cette électricité que les autres procédés ne développent chez eux qu'indirectement.

En résumé, nous pouvons conclure de tous les faits que nous avons exposés dans ce chapitre,— 1° que la production de la chaleur et de la lumière électrique ne peut avoir lieu sans l'établissement d'un circuit fermé, dont toutes les parties exercent la même action électro-dynamique extérieure, conformément aux lois de Ohm; — 2° que cette production a lieu dans les points du circuit où l'électricité en mouvement (soit décharge, soit courant) éprouve le plus de résistance; — 3° que les parties des conducteurs qui limitent les portions du circuit où la résistance est la plus grande, et où naissent par conséquent la chaleur et la lumière, éprouvent des modifications calorifiques, lumineuses et moléculaires qui dépendent à la fois de leur nature propre et de celle de l'électricité (positive ou négative) dont ils sont les électrodes; — 4° que ces modifications semblent indiquer que le mouvement de rotation des particules, dont l'accélération produite par la transmission de l'électricité est la cause probable de la chaleur et de la lumière électriques, est influencé, soit par la nature même des substances, soit par le sens de la décharge ou du courant; lesquels déterminent, dans le cas de l'étincelle et de l'arc, un mouvement de translation outre celui de rotation.

Liste des principaux travaux relatifs aux sujets traités dans ce chapitre :

Cuthberson.—Incandescence des fils par la décharge.—*Bibl. Brit.* T. XXXIX, p. 111.

Van Marum. — *Idem.* — *Bibl. Brit.* T. LVI, p. 210.

Fourcroy, Vauquelin et *Thénard.* — Incandescence par la pile. — *Annales de ch.* T. XXIX, p. 103.

Children. — Effets calorifiques d'une forte pile. — *Bibl. univ.* (1816). T. I, p. 109.

Davy. — Effets calorifiques de la pile. — *Bibl. Brit.* T. XX, p. 318 ; t. XXXIV, p. 397, et t. XXXV, p. 170. — Arc voltaïque. — *Bibl. Brit.* T. LIII, p. 225. — *Transac. phil. de* 1821 (2e partie), p. 425. — Étincelles dans le vide. — *Annales de ch. et de phys.* (1822). T. XX, p. 168.

De la Rive. — Chaleur dans les liquides. — *Arch. de l'élec.* T. II, p. 501, et t. III, p. 175. — Pouvoir réchauffant du courant. — *Annales de ch. et de phys.*

T. XL, p. 371, et t. LII, p. 147. — Arc voltaïque. — *Arch. de l'élect.* T. I, p. 262, et *Arch. des sciences phys.* T. IV, p. 345.

Riess. — Thermomètre électrique. — Lois du réchauffement. — *Bibl. univ.* (1839). T. XXII, p. 367. — *Annales de ch. et de phys.* T. LIX, p. 113, et t. LXXIV, p. 158. — *Archiv. de l'élect.* T. I, p. 555. — *Arch. des sc. phys.* T. I, p. 196, et t. XVII, p. 48. — *Ann. der physik. Passim*, et *Traité de l'électr. par frottement.*

Harris. — Réchauffement des fils par la décharge. — *Trans. phil.* (1834)

Joule. — Lois du réchauffement par les courants. — *Arch. de l'électr.* T. II, p. 54, et t. IV, p. 483.

E. Becquerel. — *Idem.* — *Annales de ch. et de phys.* (N. S.) T. IX, p. 21. — Phosphorescence et rayonnement de l'étincelle. — *Bibl. univ.* T. XX, p. 344 et 394.

Lenz. — *Idem.* — *Ann. der physik.* T. LIX, p. 203 et 467, et t. LI, p. 18. — Froid par le courant. — *Bibl. univ.* (N. S.). T. XVII, p. 387.

Pettier. — Chaleur et froid produit par le courant. — *Annales de ch. et de phys.* T. LXVI, p. 371.

Robinson. — Influence du milieu sur le réchauffement. — *Trans. of the Irish. Academy.* Vol. XXII (part. I), p. 3.

Grove. — *Idem.* — *Arch. des sc. phys.* T. IX, p. 140, et t. XII, p. 165. — Incandescence et déflagration. — *Bibl. univ.* (1839). T. V, p. 18 et 122; t. XXV, p. 426, et t. XXIX, p. 387.

Clausius. — *Idem.* — *Arch. des sc. phys.* T. XXII, p. 269.

Favre. — Chaleur dégagée dans la pile. — *Annales de ch. et de phys.* (N. S.) T. XL, p. 393.

Faraday. — Lumière et apparence de l'étincelle. — *Trans. phil.* — *Collection de Mémoires* et *Bibl. univ.* T. XVII, p. 178.

Quet. — Stratification de l'étincelle d'induction. — *Comptes rendus de l'Acad. des sc.* T. XXXV, p. 949. — Influence de l'aimant sur l'arc voltaïque. — *Idem.*

Neef. — Lumière et chaleur électrique. — *Arch. des sc. phys.* T. I, p. 30, et t. III, p. 391.

Marianini. — Étincelles dans les liquides. — *Bibl. univ.* (1843). T. XLVII, p. 253.

Sillimann. — Arc voltaïque. — *Annales de ch. et de phys.* — T. XXIV, p. 216.

Despretz. — Arc voltaïque. — *Comptes rendus de l'Acad. des sc.* T. XXX, p. 367, et t. XXXI, p. 418. — Formation du diamant. — *Compte rendu de l'Acad. des sc.* T. XXXVII (5 et 19 sept. 1853).

Van-Breda. — Arc voltaïque. — *C. R. de l'Ac. des Sc.* T. XXVIII, p. 426, et *Arch. des sc. phys.* T. III, p. 32.

Matteucci. — *Idem.* — *Arch. des sc. phys.* T. XII, p. 5, t. XIII, p. 223, et t. XVII, p. 205, et *Annales de ch. et de phys.* (N. S.). T. XXXVII, p. 44.

Daniell. — *Idem.* — *Arch. de l'électr.* T. I, p. 492.

Gassiott. — Réchauffement du fil positif. — *Bibl. univ.* T. XVIII, p. 369.

Digitized by Google

Fizeau et *Foucault*. — Lumière électrique. — *Arch. de l'électr.* T. IV, p. 311.

Foucault. — *Idem*. — *Arch. des sc. phys.* T. X, p. 222.

Masson. — Photométrie électrique. — *Annales de ch. et de phys.* (N. S.). T. XIV, p. 129, t. XXX, p. 5, et t. XXXI, p. 295.

Wheatstone. — Raies du spectre électrique. — *Traité de physique de Becquerel*. T. II, p. 127.

Duboscq. — Régulateur électrique. — *Comptes rendus de l'Acad. des sc.* T. XXXI, p. 807.

Becquerel. — Chaleur et lumière électrique ; phosphorescence. — *Traité d'électricité* et *Traité de physique*.

Draper. — Lumière d'un fil de platine incandescent. — *Phil. Mag.* T. XXX, p. 345 (1847).

Viard. — Chaleur dans les fils métalliques par le courant. — *C. R. de l'Ac. des Sc.* T. XXXIX, p. 904 [1].

[1] M. Viard a vérifié directement par l'expérience l'explication donnée par Clausius, de l'effet du milieu ambiant sur la chaleur développée par le courant dans les fils métalliques. Il a montré par l'introduction d'un rhéostat dans le circuit, que la chaleur développée est toujours proportionnelle à la résistance réelle qui existe au moment du passage du courant, comme l'avait déjà prouvé M. Robinson (p. 183); de sorte que la présence du gaz moins refroidissant, en augmentant la résistance du fil qu'il entoure, fait que le courant y développe plus de chaleur. Mais si, en raccourcissant le fil du rhéostat, on rend la résistance égale à ce qu'elle était lorsque le fil était entouré du gaz plus refroidissant, alors la quantité de chaleur dégagée par le courant est la même qu'elle était dans ce dernier cas.

CHAPITRE III.

EFFETS CHIMIQUES DE L'ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE.

§ 1. Décompositions opérées par le courant voltaïque.

Nicholson et Carlisle, peu de temps après que Volta eut construit sa pile, parvinrent à décomposer l'eau en y plongeant deux fils métalliques, dont l'un communiquait avec le pôle positif, et l'autre avec le pôle négatif. Les deux fils étaient en laiton : celui qui communiquait avec le pôle + ne donnait point de gaz, mais éprouvait une oxydation, tandis que celui qui communiquait avec le pôle — dégageait de l'hydrogène. La production du gaz était d'autant plus abondante, que les deux fils étaient plus rapprochés. Ces observateurs remarquèrent en outre que la décomposition de l'eau n'a pas lieu seulement entre les deux pôles de la pile, mais aussi entre les métaux de deux couples consécutifs séparés par le conducteur humide. Enfin ils réussirent aussi bien à obtenir l'oxygène que l'hydrogène en remplaçant par des fils de platine les fils de cuivre qui établissaient la communication entre l'eau et les pôles de la pile. Les deux gaz peuvent être recueillis séparément, si on a soin de placer au-dessus de chaque fil un tube rempli d'eau au haut duquel le gaz qui se dégage se rend naturellement ; il faut que les deux tubes ne touchent pas le fond du vase, afin que les deux fils plongent bien dans la même eau[1].

Cruikshanks, le premier, obtint un effet en plongeant dans des vases séparés chacun des pôles de la pile, qui étaient des fils d'argent, et en réunissant en même temps par un autre fil d'argent les deux vases : il vit l'hydrogène se dégager du fil qui com-

[1] Voyez t. I, p. 29, fig. 18.

muniquait avec le pôle — de la pile, tandis que le bout du fil qui plongeait dans ce même vase était attaqué. L'autre bout de ce même fil qui plongeait dans le second vase dégageait de l'hydrogène, et enfin le fil qui communiquait avec le pôle + était attaqué. Le même physicien, ayant plongé deux fils d'argent dans une solution étendue de nitrate d'argent dans l'ammoniaque, obtint au fil négatif d'abord une production abondante de gaz, ensuite des filaments qu'on reconnut être de l'argent métallique. Le fil d'argent qui communiquait avec le pôle positif ne donnait point ou que peu de gaz, vu qu'il était attaqué. Avec des fils de cuivre plongeant dans une solution de cuivre ammoniacal, Cruiskhanks obtint du cuivre métallique autour du fil négatif : le liquide perdit sa couleur, et devint semblable à de l'eau distillée, le cuivre ayant été tout précipité.

Sans nous arrêter aux autres expériences du même genre de Cruiskhanks, ni à celle de Henry sur la décomposition de l'ammoniaque, nous ajouterons que Davy obtint des résultats semblables, mais sur une plus grande échelle, avec une pile de 110 couples qui lui permit de constater que si, au lieu de réunir par un fil de métal les vases pleins d'eau où plongent deux fils d'or qui communiquent chacun aux pôles de la pile, on établit la communication par un morceau de muscle frais ou par une fibre végétale, les gaz se dégagent à l'extrémité des fils polaires, l'hydrogène au fil négatif et l'oxygène au positif. Il en est de même si la communication entre les vases est établie par l'intermédiaire du corps humain, ce qu'il est facile de faire en y plongeant un doigt de chaque main. Il n'y a aucun dégagement gazeux aux extrémités de la fibre ou des doigts qui sont immergés dans l'eau de chacun des vases, comme il y en a quand c'est un fil métallique qui les réunit. Davy remarque encore que si l'on fait communiquer au moyen de fibres musculaires chacun des pôles de la pile avec un vase rempli d'eau, et qu'on réunisse les deux vases par un fil d'argent, on obtient un dégagement d'hydrogène à l'extrémité du fil qui plonge dans le vase positif et une oxydation à l'extrémité qui plonge dans le vase négatif.

Dans toutes ces expériences, les gaz hydrogène et oxygène ne

sont pas toujours bien purs, mais ils sont plus ou moins mélangés avec de l'azote qui provient de l'air atmosphérique dissous dans l'eau; cependant, en prenant bien des précautions et en ne se servant que de fils non susceptibles de s'oxyder, tels que des fils d'or, Davy trouva que les gaz oxygène et hydrogène se dégageaient bien dans la proportion qui constitue l'eau.

Plusieurs physiciens avaient cru apercevoir la formation de corps nouveaux, et en particulier celle d'un acide particulier dans l'action de la pile sur certains liquides; mais Davy, reprenant tout le sujet, parvint, après une série de laborieuses recherches, à établir sur des bases parfaitement solides le véritable pouvoir chimique de l'électricité voltaïque. Il voulut, avant tout, constater que dans les décompositions électrochimiques il n'y avait jamais d'autres éléments dégagés à chacun des pôles que ceux contenus dans les corps soumis à l'action de l'électricité voltaïque. En opérant avec des vases de diverses substances, d'agate, de cire, de marbre de Carrare et de verre, il trouva bien des alcalis au pôle négatif et des acides au pôle positif, mais il s'assura que ces alcalis et ces acides provenaient des substances mêmes des vases que l'eau parvenait à dissoudre, surtout sous l'influence de l'électricité. On pouvait même voir, quand on avait obtenu beaucoup de soude avec un vase de verre, que celui-ci était fortement attaqué à son point de contact avec le fil de métal. Ayant observé encore des traces d'acide et d'alcali avec des vases d'or, Davy s'assura que ces éléments provenaient d'une petite quantité de sel demeurée en dissolution dans l'eau même distillée, et étant parvenu à en dépouiller complétement cette eau, il n'eut plus de trace ni d'acide ni d'alcali, sauf dans quelques cas où il y avait un peu d'ammoniaque au pôle négatif et d'acide nitreux au positif, dont la formation était évidemment due à la combinaison de l'hydrogène et de l'oxygène à l'état naissant avec l'azote dissous dans l'eau. En effet, en plaçant l'eau soumise à la décomposition dans le vide, et encore mieux dans l'hydrogène, il n'y eut plus aux deux pôles que de l'oxygène et de l'hydrogène parfaitement purs.

Ainsi il est bien établi que l'électricité dynamique agissant sur les corps susceptibles d'être décomposés ne *produit* point

d'éléments nouveaux, mais qu'elle les *dégage* des substances soumises à son action, tout en facilitant, par leur dégagement à l'état naissant, leur combinaison avec d'autres éléments présents. Il est assez remarquable que, sous l'action d'une forte électricité, les substances en apparence les plus insolubles puissent être décomposées; c'est ce que prouve un très-grand nombre d'expériences de Davy sur le verre, sur le marbre, sur les sulfates de strontiane et de baryte employés comme vases remplis d'eau.

L'électricité dynamique non-seulement dégage les éléments en les séparant, mais elle les transporte, caractère qui n'appartient qu'à ce mode de décomposition. C'est ce que Berzélius et Ilizinger avaient déjà établi. En opérant avec des fils de différents métaux et des solutions de nature diverse, soit séparées, soit mélangées, quelquefois différentes, quelquefois semblables à chacun des deux pôles, ils étaient parvenus à bien constater ce pouvoir de transport qui accompagne le pouvoir décomposant de la pile voltaïque. Pour mettre des liquides différents en contact avec chacun des fils polaires, ils se servaient d'un syphon dont les branches, fermées par des bouchons ajustés à leurs extrémités et traversés par les fils, étaient remplies jusqu'aux deux tiers de leur hauteur, l'une par un liquide, tel que du sulfate de potasse, l'autre par un autre liquide, tel que du muriate d'ammoniaque. La partie supérieure du syphon renfermait de l'eau distillée pour mettre les deux liquides en communication; elle était percée à son sommet de quelques trous destinés à laisser passer les gaz. Ils avaient conclu de toutes leurs expériences que, lorsque l'électricité traverse un liquide, les principes qu'il renferme sont séparés; que l'oxygène et les acides sont transportés au pôle positif, l'hydrogène, les alcalis, les terres et en général les bases au négatif, et cela aussi bien quand les solutions salines dans lesquelles plongent les fils métalliques qui partent de chacun des pôles sont hétérogènes que lorsqu'elles sont semblables. Les résultats nombreux auxquels ils étaient parvenus leur avaient aussi démontré l'influence sur l'énergie de la décomposition, de l'étendue du contact des fils polaires avec les liquides, et le rôle que

joue dans la production des effets observés l'affinité des éléments de ces liquides pour la substance des fils, ainsi que leur affinité réciproque quand il y a plusieurs liquides différents soumis à la fois à l'action décomposante.

Mais c'est Davy qui, par l'exactitude et le nombre de ses expériences, a analysé complétement cette faculté de transport que possède l'électricité dynamique, et qu'on ne doit pas confondre avec celle que nous avons déjà décrite dans le chapitre précédent, car elle ne se manifeste qu'avec la décomposition. Il faut, pour bien étudier ce phénomène, se servir de capsules ou de tubes en verre dans lesquels on place les liquides qu'on veut faire traverser par le courant; on plonge dans chacune des capsules, quand il y en a deux (fig. 229), ou dans les capsules extrêmes, quand il y en a plus de deux (fig. 230), les fils ou les lames de platine qui communiquent, l'un avec le pôle +, l'autre avec le pôle — de la pile; puis on réunit les liquides des capsules les uns aux autres au moyen de mèches de coton ou d'asbeste bien imbibées d'eau (fig. 231), ou par des tubes en forme de syphon remplis d'eau bien pure (fig. 229, 230). Quand on veut recueillir les gaz dégagés, on entoure chacun des fils polaires d'un tube fermé en haut et ouvert en bas, qu'on remplit du même liquide qui est contenu dans le vase où il plonge, et on réunit les deux vases (fig. 232). Si, se servant de deux capsules, on met dans

Fig. 229.

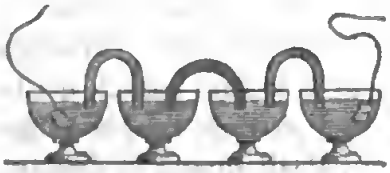


Fig. 230.

Fig. 231.

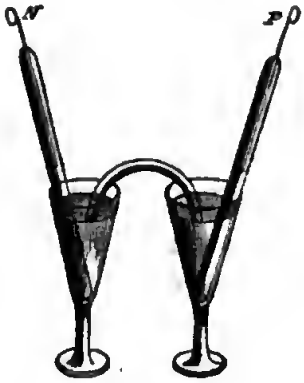


Fig. 232.

l'une de l'eau distillée, et dans l'autre une solution saline, la base ou l'acide passe dans l'eau distillée, suivant que le conducteur métallique qui y plonge est le négatif ou le positif. Il faut avoir soin de maintenir toujours le niveau de l'eau distillée plus haut que celui de la dissolution, pour qu'aucune partie de celle-ci ne passe dans l'eau. En prenant cette précaution, on peut s'assurer, par exemple, avec du sulfate de magnésie, qu'il ne passe que de la magnésie pure dans l'eau distillée, quand cette eau est en communication avec le pôle négatif, et qu'il n'y a pas trace d'acide sulfurique, puisqu'un sel de baryte ne produit aucune précipitation.

Pour connaître jusqu'où s'étend cette faculté de transport, il faut faire usage de trois capsules au moins (fig. 231) : on place la solution saline dans l'une des deux extrêmes, de l'eau distillée dans l'autre, et un réactif dans la capsule intermédiaire. Si ce réactif est de l'eau colorée en bleu par de la teinture de tournesol, en versant une dissolution de sulfate de potasse dans la capsule négative, on ne voit point l'eau colorée rougir par le passage de l'acide sulfurique ; mais la première impression de rougeur ne se montre qu'à l'extrémité de la mèche d'amiante qui fait communiquer l'eau colorée avec le vase positif, c'est-à-dire du côté le plus éloigné du vase d'où vient l'acide sulfurique. La même chose se passe pour l'alcali quand la dissolution saline étant placée dans le vase positif, il est transporté au pôle négatif. Il est facile même de démontrer que cette coloration de l'eau bleue en rouge par l'acide, en vert par l'alcali, ne provient que de la diffusion de l'acide qui est tout porté autour du fil positif, et de l'alcali qui est tout porté autour du fil négatif. Il n'y a, pour cela, qu'à se servir, comme je l'ai fait, d'un gros tube partagé en trois compartiments égaux, par deux diaphragmes en vessie qui laissent passer le courant sans permettre aux liquides de se mêler : ces trois compartiments font l'office des trois capsules ci-dessus.

L'expérience que nous venons de rapporter montre donc que, sous l'influence du courant qui les transporte, l'acide et l'alcali perdent la propriété de changer la couleur bleue végétale. Pour savoir jusqu'à quel point leur activité chimique est neutralisée,

il faut remplacer l'eau colorée de la capsule intermédiaire par des substances liquides qui aient plus ou moins d'affinité pour l'acide ou la base qui sont transportés, et s'assurer s'ils sont arrêtés au passage par ces substances. On constate de cette manière qu'une solution d'ammoniaque, de soude, de potasse ou de chaux, n'arrête point l'acide sulfurique, ni l'acide nitrique, ni l'acide hydrochlorique, qui continuent à se rendre dans l'eau distillée de la capsule positive, quand on a mis des sels de ces acides en dissolution dans la capsule négative. Si les dissolutions salines sont placées dans la capsule positive, on voit leurs bases se rendre dans l'eau distillée de la capsule négative à travers les acides placés dans la capsule intermédiaire. Il faut passablement de temps (24 à 48 heures) pour que ces effets se manifestent d'une manière bien prononcée, et il est nécessaire d'enlever et de laver de temps à autre dans de l'eau pure les mèches d'amiante qui font communiquer les capsules entre elles. La pile doit être composée d'un nombre de couples assez considérable, qui dépend du reste de l'espèce de pile dont on se sert; mais il est facile de déterminer dans chaque cas le nombre de couples nécessaire pour que l'effet se manifeste, parce qu'il y a toujours quelques bulles de gaz qui, en se dégageant aux fils polaires, indiquent le moment où le courant est assez fort pour passer.

Il est cependant des cas où la substance transportée est arrêtée par celle qu'elle traverse; l'acide sulfurique, par exemple, ne peut traverser les dissolutions de strontiane et de baryte, et ces deux bases ne peuvent pas à leur tour traverser l'acide sulfurique. Ainsi, si l'on place une dissolution de sulfate de potasse dans la capsule négative, de l'eau distillée dans la positive et une solution saturée de baryte entre deux, on n'obtient, même au bout de 30 heures, et avec une pile de 150 couples, aucune portion appréciable d'acide dans l'eau distillée, mais il se forme dans le vase intermédiaire beaucoup de sulfate de baryte. Ainsi encore, une dissolution d'hydrochlorate de baryte étant placée dans la capsule positive, du sulfate de potasse dans la capsule intermédiaire, on voit la potasse paraître bientôt dans l'eau distillée qui est dans la capsule néga-

tive, et un précipité abondant de sulfate de baryte se former dans le vase du milieu. Si la dissolution intermédiaire est du sulfate d'argent, l'hydrochlorate de baryte étant placé du côté négatif, on voit de l'acide sulfurique paraître dans l'eau distillée du côté positif, et un précipité abondant de chlorure d'argent se former dans la solution d'argent.

Les expériences qui précèdent montrent donc que la puissance neutralisante du courant a une limite qui dépend du degré d'affinité de la substance transportée pour celle qui est contenue dans la solution qu'elle traverse; que, par exemple, l'acide sulfurique peut traverser une dissolution de potasse, de soude, etc., sans être arrêté, mais qu'il est arrêté par une dissolution de baryte, parce qu'il forme avec elle un composé insoluble. Elles montrent encore qu'il peut se faire un échange de base ou d'acide entre le courant et la dissolution qu'il traverse, de telle façon que le courant cède à cette dissolution l'acide ou la base qu'il transportait, et prend à sa place l'acide ou la base du sel dissous.

Un phénomène analogue et non moins important pour la théorie des décompositions électro-chimiques est que certaines bases peu ou point solubles, telles que la magnésie et plusieurs oxydes métalliques provenant de dissolutions salines placées dans la capsule positive, peuvent bien passer dans la capsule négative remplie d'eau distillée, si les deux capsules communiquent seulement par une mèche d'amiante; mais si l'on interpose entre elles un vase d'eau pure en établissant, toujours au moyen de mèches d'amiante, la communication entre ce vase et les deux autres, alors les particules transportées tombent au fond de l'eau du vase intermédiaire, et ne vont pas jusqu'au vase négatif.

Jusqu'ici nous n'avons parlé que de la décomposition des sels et de l'eau, mais Davy trouva que l'eau n'est pas le seul composé binaire que le passage de l'électricité puisse séparer dans ses éléments, que les acides et les oxydes sont aussi décomposés, et il parvint ainsi à démontrer que la potasse, la soude et les différentes terres ne sont que des oxydes dont il réussit à obtenir le métal. Ayant pris un morceau de potasse pure qui

avait été quelques instants exposé à l'air, de manière à devenir conducteur à sa surface à cause de l'humidité qu'il avait attirée, il le plaça sur une plaque isolée de platine mise en communication avec le pôle négatif d'une forte pile voltaïque de 250 couples, puis il toucha la surface supérieure du morceau avec une pointe de platine communiquant au pôle positif. Il se dégagea autour du fil une grande quantité de gaz qu'on reconnut être de l'oxygène pur, et on découvrit à la partie inférieure de la potasse des petits globules qui avaient un éclat métallique brillant, mais qui ne tardèrent pas à être ternis et recouverts par un enduit blanc qui se formait à leur surface. Ces globules décomposaient l'eau avec une grande vivacité, dégageant de l'hydrogène, et s'oxydant avec développement de chaleur et de lumière. Dans l'air sec ils se recouvraient seulement d'une couche d'oxyde qui, faute d'humidité pour la dissoudre, restait sur la surface en protégeant l'intérieur de la substance contre l'action de l'oxygène.

Un morceau de soude présenta exactement les mêmes phénomènes; il fallait seulement une pile un peu plus forte pour obtenir les globules métalliques, et ceux-ci étaient eux-mêmes moins rapidement oxydés à l'air.

Après avoir prouvé que la potasse et la soude sont donc des oxydes de deux métaux qu'il nomma *potassium* et *sodium*, Davy réussit à en obtenir une assez grande quantité, en les recueillant à mesure qu'ils étaient formés dans de l'huile de naphte récemment distillée, qui est sans action sur eux, et où ils se conservent parfaitement intacts. Ces deux substances ont toutes les propriétés des métaux, et elles en ont l'éclat, présentant un aspect très-semblable à celui de l'argent poli. Elles conduisent la chaleur et l'électricité; elles fondent, le potassium à 75° 5, et le sodium seulement à 82° 5, elles cristallisent et deviennent cassantes à 0°. Leur densité est moindre que celle de l'eau [1]. Ces deux métaux s'amalgament facilement avec le mercure, et c'est même un moyen de les retirer de leurs oxydes : on met un globule de mercure sur un morceau de potasse ou de soude

[1] Celle du potassium est de 0,865, et celle du sodium de 0,972.

placé lui-même sur une lame de platine qui communique avec le pôle positif, puis on fait aboutir dans le globule une pointe de platine liée au pôle négatif de la pile. Le métal alcalin est ensuite facilement retiré de son amalgame par la distillation opérée dans l'huile de naphte, et les petits globules obtenus, soit de cette manière, soit directement, sont convertis en un seul culot par la fusion opérée toujours dans l'huile de naphte.

Davy étendit plus tard sa découverte à d'autres composés, et, grâce à ses travaux et à ceux de quelques autres chimistes, il fut démontré que toutes les terres et les alcalis fixes étaient des oxydes métalliques dont on parvint à extraire plus ou moins facilement les bases, d'abord au moyen de la force décomposante de l'électricité dynamique, plus tard par des procédés purement chimiques. Nous aurons l'occasion de comparer les deux modes dans celui des chapitres de la sixième partie consacrés aux applications, qui aura pour objet l'emploi de l'électricité dynamique pour l'extraction des métaux.

Les phénomènes fondamentaux des décompositions électro-chimiques que nous venons de décrire suffisent déjà pour nous permettre de constater quelques principes généraux. D'abord ils nous prouvent que la décomposition électro-chimique est un phénomène d'électricité dynamique, et non un phénomène d'électricité statique. En effet, tout ce qui favorise le passage du courant facilite la décomposition; c'est ce que Gay-Lussac et Thénard ont achevé de démontrer dans leurs recherches physico-chimiques. Ils ont prouvé que la quantité de gaz dégagée dans la décomposition de l'eau, très-faible quand l'eau est pure, augmente avec la quantité de sel ou d'acide qu'on y dissout, et par conséquent avec son degré de conductibilité; qu'elle est également, jusqu'à une certaine limite, plus grande à mesure que s'accroît la surface de contact entre le liquide et les conducteurs polaires. L'élévation de température qui augmente la conductibilité du liquide facilite sa décomposition. Tous ces résultats montrent donc qu'il est impossible d'attribuer la décomposition des corps à une attraction exercée par les deux pôles sur les molécules

constituantes, les unes positives, les autres négatives, et qui serait analogue aux attractions et aux répulsions électriques ordinaires.

Un autre point bien établi, c'est que la portion du liquide qui est décomposée est uniquement celle qui est en contact avec les conducteurs polaires, qu'elle soit la même ou qu'elle soit différente aux deux pôles, ainsi que l'ont prouvé les recherches de Hizinger et Berzélius. Les liquides intermédiaires, quand ils ne sont séparés les uns des autres et des liquides polaires que par des diaphragmes poreux ou des conducteurs humides, n'éprouvent aucune altération dans leur composition, sauf dans les cas exceptionnels que nous avons signalés plus haut, d'après Davy. C'est également sur la surface des métaux qui servent de pôles que se déposent les éléments séparés, comme le prouvent la simple inspection quand il s'agit des éléments gazeux et solides, et l'emploi des réactifs quand il s'agit des éléments liquides. On cite quelquefois comme preuve que le liquide interposé entre les pôles se constitue par moitié en deux états opposés de tension électrique, l'expérience élégante d'une solution saline, de sulfate de soude, par exemple, colorée en bleu qui, placée, dans un tube en forme de U (fig. 233), se colore moitié en rouge, moitié en vert, quand elle est mise dans le circuit de la pile au moyen de deux fils de platine. Mais cette double coloration n'est que l'effet de la diffusion de l'acide et de l'alcali qui, dégagés à chacun des pôles, se répandent graduellement dans les parties environnantes du liquide. C'est ce que j'ai prouvé en plaçant la solution saline dans un vase séparé en trois compartiments par deux vessies qui empêchent les solutions contenues dans chacun des compartiments de se mélanger, tout en permettant au courant de les traverser. Quelque longue qu'ait été la durée de la décomposition, la couleur du liquide contenu dans la case du milieu n'a point été altérée, tandis que les liquides renfermés dans les

Fig. 233.

deux cases extrêmes où plongeaient les deux pôles ont changé complétement de couleur.

Nous avons vu que si l'on a à la suite les uns des autres plusieurs vases remplis d'eau acidulée ou d'une solution saline, et que si, au lieu de les unir par des conducteurs humides, on les fait communiquer les uns aux autres par des arcs métalliques, on a alors dans chaque vase séparément, une décomposition exactement la même que celle qui aurait lieu si le liquide de ce vase était seul dans le circuit. Ainsi on obtiendra dans les deux tubes de chacun des trois vases de la fig. 234, qui sont remplis d'eau acidulée, de l'oxygène et de l'hydrogène dans la proportion qui constitue l'eau, l'oxygène étant dans les tubes tournés du côté du pôle positif, et l'hydrogène dans ceux tournés du côté du pôle négatif. De même si on a une série de tubes en U (fig. 235) remplis d'une solution saline colorée en bleu, et réunis par des fils de platine courbés en formes d'arc et plongeant par une de leurs extrémités dans l'un des tubes, et par l'autre dans le suivant, tandis que les deux branches extrêmes communiquent par des fils de platine, l'une avec le pôle positif, l'autre avec le pôle négatif de la pile, on voit la solution se colorer en rouge dans toutes celles des branches des tubes qui sont tournées du côté du pôle positif, y compris celle où plonge ce pôle, et en vert dans toutes celles qui sont tournées du côté du pôle négatif, y compris celle qui communique immédiatement avec ce pôle. Il suffit de changer les deux pôles de place pour voir toutes les parties rouges et vertes du liquide repasser

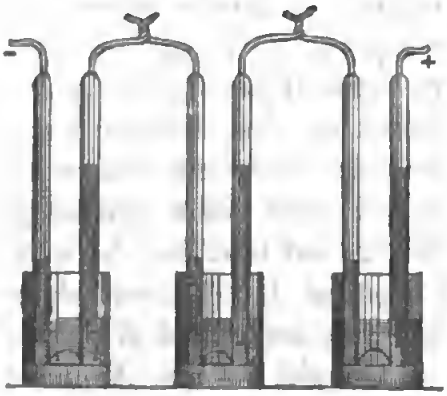


Fig. 234.

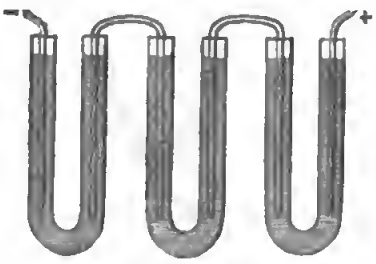


Fig. 235.

d'abord au bleu, puis celles qui étaient rouges passer au vert, et celles qui étaient vertes passer au rouge.

Un point important à noter, c'est que, lorsqu'on décompose les solutions salines, il y a en même temps un dégagement gazeux aux pôles, qui semble indiquer une décomposition simultanée de l'eau. Toutefois il y a une différence importante à faire à cet égard entre les sels dont la base se montre à l'état d'oxyde au pôle négatif, et ceux où elle paraît à l'état métallique revivifié; dans ce dernier cas, il y a, comme dans le premier, dégagement de l'oxygène avec l'acide au pôle positif, mais il n'y a pas d'hydrogène au pôle négatif, comme si ce gaz était employé à réduire l'oxyde qui forme la base du sel. Nous verrons plus tard ce qui se passe exactement dans ce cas. Bornons-nous, pour le moment, à remarquer que le métal revivifié se montre tantôt à l'état de lames adhérentes à la surface du conducteur qui sert de pôle, quelquefois à l'état de poudre, quelquefois à l'état cristallin ou en formant des arborisations remarquables. L'une des plus élégantes est celle qu'on obtient en se servant de l'acétate de plomb et en plongeant au milieu d'un vase qui renferme cette solution un fil de platine en communication avec le pôle négatif d'une pile dont l'autre pôle communique également avec le liquide par le moyen d'un fil ou d'une lame qui plonge vers le bord du vase. Si le courant n'est pas trop fort, les arborisations se forment lentement et d'une manière très-brillante, tandis qu'elles sont confuses avec un courant très-énergique. La force du courant influe, en effet, comme nous le verrons, aussi bien que la nature même du sel soumis à l'action décomposante de l'électricité, sur la structure des dépôts qui ont lieu dans ce cas.

Avant de pousser plus loin l'étude des phénomènes de décomposition et la recherche des lois précises qui les régissent, nous croyons utile de faire connaître ici la manière ingénieuse dont Grotthus a réussi à les expliquer. Partant du principe posé par Davy, et admis plus tard par Berzélius et par Ampère, que les atomes constituants des corps sont, les uns électro-positifs, et les autres électro-négatifs, et que c'est en vertu de l'attraction mutuelle des éléments électro-positifs et des

éléments électro-négatifs que la combinaison chimique s'opère, voici comment il rend compte de ce qui se passe dans la décomposition électro-chimique d'un composé quelconque, de l'eau, par exemple. Dès qu'un filet d'eau est placé dans le circuit, il est polarisé, comme nous avons vu que doit l'être tout conducteur interposé entre les pôles[1]; mais l'hydrogène étant un corps éminemment positif, les molécules d'hydrogène de chaque particule d'eau se tournent du côté du pôle négatif, et les molécules d'oxygène, qui est éminemment négatif, du côté du pôle positif (fig. 236)[2]. Le courant passe, c'est-à-

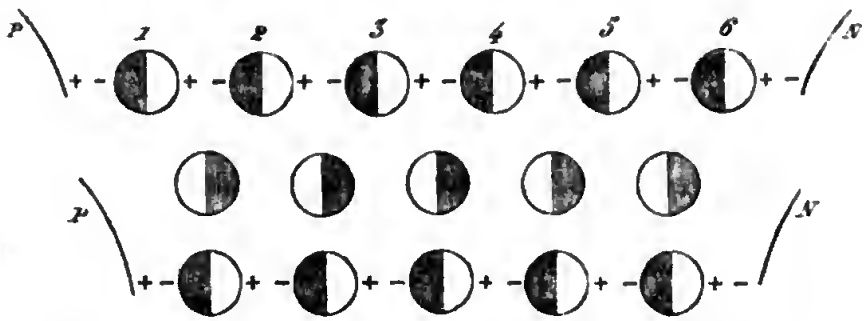


Fig. 236.

dire qu'il y a décharge des molécules consécutives entre elles et des deux molécules extrêmes avec les pôles. Il en résulte que l'oxygène négatif de la molécule d'eau n° 1, qui est en contact avec le pôle positif P, se dégage contre ce pôle avec l'électricité duquel son électricité négative se combine, et que l'hydrogène positif de la molécule n° 6, en contact avec le pôle négatif, se dégage de même contre ce pôle; maintenant, l'hydrogène de la molécule d'eau n° 1 se combine avec l'oxygène de la molécule n° 2, l'hydrogène du n° 2 avec l'oxygène du n° 3, et ainsi de suite jusqu'à la dernière particule. En d'autres termes, la décharge qui s'opère entre les molécules d'eau consécutives pour constituer le courant, tirant tous les hydrogènes du pôle + au pôle — et tous les oxygènes du pôle — au pôle +, elle libère l'hydro-

[1] Tome II, page 5.

[2] Dans chaque molécule d'eau la particule d'hydrogène est claire, celle d'oxygène est ombrée.

gène de la molécule en contact avec le pôle —, et l'oxygène de la particule en contact avec le pôle +, et oblige en même temps tous les oxygènes et hydrogènes des particules intermédiaires de se combiner ensemble pour reformer de l'eau. La seconde série des particules de la fig. 236 représente ces nouvelles particules d'eau. Ce que le premier passage opère, le second passage l'opère de même, c'est-à-dire que les particules sont de nouveau polarisées, et par conséquent doivent toutes faire une demi-révolution pour que les oxygènes soient tournés du côté du pôle + et les hydrogènes du côté du pôle —, comme les représente la troisième série des particules de la figure 236; puis la décomposition a lieu, ainsi que l'échange des parties constituantes entre chacune de ces particules, avec dégagement de gaz aux particules extrêmes, et ainsi de suite tant que le courant est transmis. On voit donc, puisqu'il n'y a que de l'oxygène au pôle + et que de l'hydrogène au pôle —, qu'on n'est plus embarrassé pour expliquer ce que devient l'hydrogène de la particule en contact avec le pôle positif, et l'oxygène de celle qui est en contact avec le pôle négatif.

L'explication que nous venons de donner, en prenant l'eau pour exemple, s'applique également bien à la décomposition de tout corps composé. Dans le cas où la solution interposée entre les pôles n'est pas homogène, mais se compose de deux ou trois solutions différentes, l'échange se fait de même. Ainsi, si le pôle positif est en contact avec une solution de nitrate de potasse et le négatif avec une solution de sulfate de soude, l'acide sulfurique de la dernière particule du sulfate et la potasse de la première particule du nitrate se combinent, en libérant une molécule de soude au pôle —, et une d'acide nitrique au pôle +, puis cette particule d'acide sulfurique se combine avec une seconde de potasse, en libérant une seconde particule de soude au pôle —, une seconde d'acide nitrique au pôle +, jusqu'à ce qu'enfin l'acide sulfurique parvienne aussi au pôle + et la potasse au pôle —, et que, conformément aux observations de Berzélius et de Hizinger, on ait les deux acides au pôle + et les deux bases au pôle —. S'il y a une troisième solu-

tion entre les deux, c'est également par voie de décomposition et de combinaison que se fait le passage du courant et le transport des particules. Seulement si le composé momentanément formé est insoluble, alors, comme nous l'avons vu, ses éléments ne sont plus transportés aux deux pôles, et sont remplacés par ceux qui n'ont pas formé de composé insoluble. Ainsi, si la solution interposée est de l'hydrochlorate de baryte, l'acide sulfurique formant avec la baryte un composé insoluble, le sulfate de baryte est précipité au fond du vase intermédiaire, et est remplacé au pôle + par l'acide hydrochlorique. De même si le sel placé au pôle positif est du nitrate d'argent, et celui placé au milieu de l'hydrochlorate de soude, l'argent qui forme avec l'acide hydrochlorique un corps insoluble, est précipité, et la soude se rend au pôle négatif à sa place.

Nous verrons plus loin que cette théorie rend très-bien compte des faits généraux, ainsi que des phénomènes secondaires que l'étude plus approfondie que nous ferons des décompositions électro-chimiques nous fera découvrir. Remarquons seulement, dès à présent, que nous n'admettons pas la distinction des éléments des corps en électro-positifs et électro-négatifs, telle qu'elle a été en général formulée, distinction qui ne peut se soutenir en regard du fait qu'un même corps peut se conduire suivant la combinaison dans laquelle il entre, tantôt comme électro-positif, tantôt comme électro-négatif : par exemple, le chlore, qui se rend au pôle + quand il est combiné avec l'hydrogène dans l'acide hydrochlorique, et au pôle — quand il est combiné avec l'oxygène dans les acides chloriques. La propriété dont il s'agit ne peut plus être que relative ; et elle consiste en ce que, dès que le courant traverse un conducteur liquide composé, il polarise les molécules de ce liquide de façon que, parmi leurs éléments, les uns se chargent d'électricité négative et les autres de positive, le même élément pouvant, suivant celui avec lequel il est combiné, se charger également ou de l'une ou de l'autre. Nous essaierons, quand nous nous occuperons de l'électricité dégagée dans les actions chimiques, et par conséquent des rapports plus intimes qui existent entre ces deux genres de force, de montrer que cette propriété peut se concilier facilement avec

l'hypothèse que nous avons faite précédemment, savoir, que les atomes des corps ont tous une polarité naturelle.

§ 2. Lois des décompositions électro-chimiques. — Action définie du courant.

On avait cru longtemps que la présence de l'eau était nécessaire pour qu'un corps liquide pût être décomposé par le courant électrique. On avait même remarqué comme un fait assez curieux que l'eau, qui, lorsqu'elle est pure, se décompose très-difficilement, étant elle-même un très-mauvais conducteur de l'électricité, peut rendre conducteurs, en les dissolvant, des corps tels que les acides sulfurique, sulfureux et d'autres, qui ne conduisent point ou presque point l'électricité par eux-mêmes. Davy avait cependant déjà observé qu'on peut se servir, comme liquides conducteurs pour charger des piles, de sels tels que le chlorate de potasse à l'état de fusion, mais il avait toujours considéré la présence de l'eau comme nécessaire dans le liquide placé entre les pôles pour être décomposé. C'est Faraday qui, ayant réussi à transmettre des courants, même d'une faible intensité, à travers des chlorures et des sels amenés à l'état de fusion par l'action d'une haute température, a montré en même temps que ces corps étaient décomposés par ces courants dans leurs éléments, dont les uns se portaient au pôle positif, les autres au négatif. Ainsi, en plaçant quelques-unes de ces solutions en fusion dans de petits tubes de verre en forme de U, et en introduisant dans chaque branche un fil de platine pour transmettre le courant à travers la substance, il trouva, avec des iodures et des chlorures de plomb, d'argent, etc., de l'iode et du chlore au pôle positif, et du plomb, de l'argent, en un mot, le métal revivifié au pôle négatif. Mais il faut, pour que la décomposition ait lieu, que les corps liquéfiés par la chaleur deviennent conducteurs par le fait de ce changement d'état, afin que le courant puisse passer. Or, il y a un grand nombre de corps, tels que des sulfures, des perchlorures, ainsi que plusieurs substances organiques, qui ne deviennent pas conducteurs en étant liquéfiés, et qui, par conséquent, ne sont pas dé-

composés. L'inverse est également vrai, c'est-à-dire que tout corps composé qui devient conducteur par la liquéfaction est décomposé par le courant, les exceptions à cette règle que cite Faraday n'étant qu'apparentes, comme nous le verrons bientôt. Il y a donc une grande différence entre la simple conductibilité que nous pouvons appeler physique, et la conductibilité accompagnée de la décomposition électro-chimique. La première, qui est propre aux corps solides et aux corps liquides élémentaires, tels que le mercure et les métaux fondus[1], diminue par l'effet de l'élévation de la température, ainsi que nous l'avons vu aussi bien pour les liquides que pour les solides ; la seconde, qui appartient aux corps liquides composés, augmente au contraire avec le réchauffement qui favorise la décomposition. Il en résulte qu'elle semble presque être une conséquence de cette décomposition, ou que tout au moins elle lui est intimement liée, de manière à ne former presque avec elle qu'un seul et même phénomène. Cependant Faraday et quelques physiciens croient que les liquides composés peuvent conduire une proportion sensible, quelquefois minime, d'électricité, sans être décomposés, et posséder par conséquent à un certain degré la conductibilité physique. Nous examinerons plus loin, quand nous aurons bien étudié les phénomènes qui accompagnent la décomposition, et que nous en aurons déterminé les lois, jusqu'à quel point cette opinion est fondée.

Nous voyons donc que tout corps composé, conducteur de l'électricité, peut être décomposé par le passage du courant quand il est à l'état liquide, qu'il ait été amené à cet état, soit par la dissolution dans l'eau, soit par la fusion. Nous allons maintenant rechercher les lois plus précises suivant lesquelles s'opère cette décomposition ; et pour rendre notre travail plus

[1] Inglis et Palmieri avaient cru que l'iode fondu est un conducteur de l'électricité ; mais Beetz s'est assuré par des expériences très-précises que les légères traces de conductibilité que présente l'iode à l'état de fusion, tiennent à son mélange avec un peu d'acide hydriodique, qui est décomposé par le courant. Du reste le brôme, le chlore liquide, le soufre, le sélénium et le phosphore fondus ne sont pas conducteurs, de sorte que parmi les corps élémentaires il n'y a que les métaux et le charbon qui conduisent l'électricité.

facile, nous adopterons les termes introduits par Faraday dans cette partie de la science. Ainsi nous nommerons *électrolyse* la décomposition chimique opérée par l'électricité, pour la distinguer de l'*analyse*, qui est la décomposition opérée par les moyens purement chimiques, et dont elle diffère par des caractères très-prononcés. Nous appellerons *électrolytes* les corps susceptibles d'être décomposés par voie électro-chimique. Enfin nous conserverons le nom d'*électrodes* aux conducteurs qui établissent la communication entre les pôles de la pile et l'électrolyte[1].

La première loi que nous rencontrons, et qui a été établie par Faraday, est que l'action décomposante d'un courant est constante pour une même quantité d'électricité. Ainsi, si on a plusieurs voltamètres placés à la suite les uns des autres de manière à être traversés par le même courant pendant le même temps, on trouve que la quantité des gaz oxygène et hydrogène dégagée dans chacun est semblable, lors même que les solutions conductrices et la grandeur des électrodes diffèrent d'un voltamètre à l'autre. Ces solutions peuvent être acides, alcalines ou salines; elles peuvent être plus ou moins étendues, et pourtant elles donnent la même quantité de gaz quand elles sont traversées par le même courant pendant le même temps. Quant aux électrodes, il faut qu'ils soient en platine et disposés de façon que les gaz aient le trajet le plus court possible à faire dans le liquide qui en dissout toujours plus ou moins, ce qui risque de faire croire à des différences dans la quantité de gaz dégagée. Il faut aussi avoir soin, surtout lorsque les électrodes ont une grande surface de contact avec les liquides, de ne pas laisser le mélange gazeux d'oxygène et d'hydrogène en contact avec les électrodes de platine, parce que le platine, par son seul contact avec ce mélange, détermine la combinaison des deux gaz. Il vaut même mieux recueillir les gaz séparément et me-

[1] M. Faraday appelle *anode* l'électrode positif, et *cathode* le négatif; il désigne également par *anions* ceux des éléments de l'électrolyte qui se dégagent au pôle positif, et par *cathions* ceux qui se dégagent au pôle négatif, donnant le nom de *ions* à ces deux classes d'éléments. Nous ne nous servirons pas de ces diverses dénominations qui ne semblent pas indispensables, tandis que celles que nous avons adoptées sont éminemment utiles.

surer l'un d'eux, l'hydrogène, par exemple, qui se dissout moins facilement; c'est, en général, ce que faisait Faraday. Nous verrons dans le paragraphe quatrième, en nous occupant de l'influence exercée par les électrodes sur l'électrolyse, les erreurs que peut faire naître l'inobservation des précautions que nous venons d'indiquer.

Ainsi donc, lorsqu'on recueille tout le gaz qui provient de la décomposition de l'eau acidulée ou saline, et qu'aucun effet secondaire, comme cela arrive avec certaines dissolutions, n'en dissimule une partie, on a dans le volume de ce gaz une mesure exacte de la quantité d'électricité qui passe; c'est pourquoi Faraday a appelé voltamètre l'appareil fondé sur ce principe. Cela est si vrai, que si on réduit de moitié cette électricité en plaçant parallèlement l'un à l'autre deux voltamètres parfaitement semblables, le courant se partage également entre eux, et dégage dans chacun d'eux une quantité de gaz qui est exactement la moitié de celle qui est dégagée dans un troisième voltamètre placé dans le circuit de façon à être traversé en entier par le courant. S'il existe quelque différence de conductibilité entre les deux voltamètres parallèles, parce que l'un d'eux a des électrodes plus grands ou renferme une dissolution plus acide, les quantités de gaz dégagées dans chacun ne sont plus les mêmes, mais leur somme est toujours égale à la quantité de gaz dégagée dans le voltamètre unique. C'est ce que Matteucci a très-bien démontré.

Mais ce n'est pas seulement sur des dissolutions aqueuses où l'eau seule est décomposée que la puissance chimique d'un courant électrique est toujours proportionnelle à la quantité absolue d'électricité transmise : cette même propriété existe pour tous les électrolytes; d'où il résulte nécessairement que lorsqu'un même courant traverse pendant le même temps deux ou plusieurs corps composés, soit électrolytes, il doit nécessairement séparer dans chacun d'eux leurs éléments en quantité proportionnelle à leurs équivalents chimiques[1]. Cette belle loi a été établie par Faraday par un grand nombre d'expériences. Ainsi

[1] Nous entendons par équivalents chimiques les poids relatifs des éléments qui entrent dans la composition d'un corps. Ainsi l'équivalent de l'hydrogène est

il a disposé à la suite l'un de l'autre, dans le même circuit, un voltamètre et un tube rempli de protochlorure d'étain placé dans un tube de verre où pénétraient deux fils de platine et tenu à l'état de fusion par une lampe d'alcool. L'un des fils de platine plongés dans le protochlorure communiquait avec le pôle négatif de la pile, l'autre avec un des électrodes du voltamètre dont le second électrode aboutissait au pôle positif. Après avoir fait durer quelque temps la décomposition, on l'interrompit, puis on pesa avec soin le fil de platine recouvert d'étain dont on avait déterminé le poids auparavant; cette pesée donna 3 gr. $\frac{1}{2}$ pour le poids de l'étain provenant de la décomposition; le poids de l'eau décomposée, conclu du volume gazeux mesuré avec soin dans le voltamètre, se trouva être 0 gr., 49 environ, ce qui donne 735 pour l'équivalent de l'étain, celui de l'eau étant de 112, nombre qui est bien le véritable. Le protochlorure d'étain qui reste après l'opération est parfaitement pur, en sorte qu'il est évident qu'il a été dégagé au pôle positif une quantité de chlore équivalente à celle de l'étain métallique porté à l'électrode négatif. Seulement les actions secondaires, telles que celle du chlore sur le métal réduit, lorsque les deux électrodes sont très-rapprochés, rendent quelquefois trop faible le poids du métal réduit. Avec les iodures qui sont également décomposés à l'état de fusion, le même inconvénient se présente à cause de la formation de périodures à l'électrode positif. En général, il faut beaucoup de précautions et un choix particulier d'électrolytes, pour que la loi se manifeste d'une manière bien nette sans être troublée par des effets secondaires.

Pour la faire bien ressortir, Faraday essaya de placer plusieurs électrolytes différents à la suite les uns des autres sur la route du courant, par exemple, l'eau acidulée dans le volta-

12,50, celui de l'oxygène étant 100, d'où résulte que l'équivalent de l'eau est 112,50, ce qui signifie que 100 grammes d'oxygène se combinent avec 12,50 d'hydrogène pour faire 112,50 d'eau. L'équivalent de l'étain est 735,29, et celui du chlore 442,65, d'où résulte que 735,29 d'étain se combinent avec 442,65 de chlore pour former 1177,94 de chlorure d'étain. De même 100 oxygène se combinent avec 735,29 d'étain pour faire 835,29 d'oxyde d'étain et 442,65 de chlore font avec 12,50 d'hydrogène 455,15 d'acide chloridrique, etc.

mètre, le protochlorure d'étain et le chlorure de plomb, et il obtint des quantités d'étain, de plomb, de chlore, d'oxygène et d'hydrogène équivalentes les unes aux autres. Il est évident que, dans ce cas, c'est l'électrolyte le moins conducteur, qui détermine l'effet total, effet qui est le même dans tous.

Ainsi nous pouvons regarder comme complétement démontré que l'action chimique de l'électricité est *définie*, et que *la même quantité d'électricité, soit le même courant électrique, décompose des quantités chimiquement équivalentes de tous les corps qu'il traverse*, d'où résulte que *les poids des éléments qu'il sépare dans ces électrolytes sont tous entre eux comme les équivalents chimiques de ces éléments.*

La loi que nous venons d'établir doit être générale, mais quand il s'agit de la constater pour le cas de corps composés autres que les binaires, et pour celui où ces composés sont eux-mêmes dissous dans un électrolyte tel que l'eau, on rencontre des difficultés très-grandes dont l'une des principales est la formation de produits secondaires qu'on a souvent de la peine à distinguer des produits directs de la décomposition. Ainsi lorsqu'on veut décomposer une solution d'ammoniaque dans laquelle on a eu soin de dissoudre du sulfate d'ammoniaque pour la rendre meilleure conductrice, on obtient de l'azote très-pur à l'électrode positif et de l'hydrogène au négatif dans la proportion de 3 ou 4 volumes d'hydrogène pour 1 d'azote. Il semble résulter de là que l'ammoniaque seul a été décomposé, et cependant si l'on met un voltamètre dans le même circuit, on trouve que l'hydrogène y est dégagé exactement en même quantité que dans la dissolution ammoniacale, ce qui semble prouver que dans celle-ci l'eau seule a été décomposée et que l'azote qui se montre à l'électrode positif, n'est que le résultat secondaire de l'action sur l'ammoniaque de l'oxygène naissant provenant de la décomposition de l'eau ; d'autant plus que cet azote est souvent mélangé avec un peu d'oxygène et que sa proportion varie avec le degré plus ou moins grand de concentration de la dissolution [1]. Ainsi encore si on décompose de

[1] Nous serions plutôt disposés à admettre que c'est le sulfate hydraté d'ammo-

l'acide nitrique, qui est très-bon conducteur, on obtient de l'oxygène à l'électrode positif, et il n'y a point de gaz au négatif; mais on y trouve de l'acide nitreux et du deutoxyde d'azote qui rendent, en se dissolvant, l'acide jaune ou rouge : cet effet est-il le résultat de la décomposition directe de l'acide nitrique en oxygène et en acide nitreux ou deutoxyde d'azote, ou bien de la décomposition de l'eau renfermée dans l'acide dont l'oxygène paraît à l'électrode positif, pendant que l'hydrogène désoxyde en partie l'acide à l'électrode négatif? Ce qui semblerait favorable à la seconde hypothèse, c'est que si l'on dissout l'acide nitrique dans une fois son volume d'eau ou davantage, on obtient sur l'électrode négatif un dégagement gazeux dont la quantité varie suivant les différences dans la force de l'acide ou dans la force du courant, et en mettant un voltamètre dans le même circuit, on trouve que l'oxygène se dégage également dans les deux solutions, ce qui semble prouver que dans l'acide comme dans le voltamètre, l'eau seule est décomposée. Cependant ces conclusions de Faraday ne sont pas, comme nous le verrons, complétement exactes; suivant ce même physicien, l'acide sulfurique n'est pas directement électrolysable, mais il se dépose dans certains cas du soufre à l'électrode négatif par la réaction de l'hydrogène provenant de la décomposition de l'eau. L'acide hydrochlorique éprouve par contre une décomposition directe et définie, ainsi que les acides hydriodique, hydrobromique et hydrocyanique; c'est ce qui résulte de la comparaison de l'hydrogène dégagé par l'électrolyse avec l'hydrogène dégagé dans un voltamètre mis dans le même circuit.

Mais ce qu'il importe surtout d'étudier, c'est ce qui se passe dans la décomposition d'une dissolution saline. Nous avons vu qu'avec les sels à bases alcalines ou terreuses on obtient à la fois de l'oxygène et de l'acide au pôle positif, de l'hydrogène et de l'alcali au pôle négatif, d'où il semble résulter que l'eau et

niaque qui est décomposé, que tandis que l'hydrogène de l'ammoniaque et celui de l'eau se dégagent à l'électrode négatif, l'acide sulfurique, l'azote de l'ammoniaque et l'oxygène de l'eau, vont à l'électrode positif, et que là peut-être l'oxygène naissant décompose une partie de l'ammoniaque libre de la dissolution.

le sel sont tous deux décomposés à la fois. M. Daniell, qui a fait de nombreuses expériences sur ce sujet, s'est d'abord assuré que la décomposition d'un équivalent d'eau est accompagnée de celle d'un équivalent exact de la dissolution saline. Pour arriver à ce résultat, il avait partagé un voltamètre, au moyen d'une cloison poreuse, en deux compartiments égaux, dont l'un renfermait l'électrode positif et l'autre l'électrode négatif, et qui tous deux étaient remplis d'une dissolution de sulfate de soude qui recouvrait les électrodes. Les gaz hydrogène et oxygène provenant de l'électrolysation étaient recueillis séparément et mesurés avec soin ; puis après avoir fait durer l'expérience assez longtemps, on déterminait exactement la quantité d'acide libre qui se trouvait dans le compartiment positif et celle d'alcali qui était dans le négatif, et on trouvait ainsi qu'il y avait un équivalent de chacun en même temps qu'il y avait un équivalent d'eau décomposée. On s'était assuré préalablement que la cloison poreuse, tout en laissant passer le courant, ne permettait pas aux liquides de se mélanger. La même expérience fut répétée en mettant dans le circuit un voltamètre ordinaire chargé avec une solution d'acide sulfurique dont les électrodes étaient de même dimension que ceux du voltamètre à deux cloisons rempli de sulfate de soude. Or, les quantités de gaz dégagées dans les deux voltamètres furent sensiblement égales, et on trouva en outre dans celui où était le sulfate de soude la même quantité d'acide et d'alcali libres. Ainsi, si on admet que le courant décompose à la fois l'eau et le sulfate de soude, on arrive à la conclusion extraordinaire que le même courant, qui sépare seulement un équivalent d'oxygène d'un équivalent d'hydrogène dans l'un des voltamètres, peut séparer en même temps dans l'autre un équivalent d'oxygène d'un équivalent d'hydrogène et un équivalent d'acide sulfurique d'un équivalent de soude. Ce qu'il y a de curieux, c'est que la température du liquide s'élève considérablement dans le vase où est la dissolution de sulfate de soude, et très-peu dans celui où est la dissolution acide. Les résultats furent les mêmes en substituant du nitrate de potasse au sulfate de soude. En remplaçant dans les expériences précédentes le sulfate de soude

dans la cellule à double compartiment par l'acide sulfurique étendu d'eau, Daniell constata un transport très-prononcé d'acide à l'électrode positif, et il trouva qu'il passait environ le quart d'un équivalent d'acide pour un équivalent entier d'eau décomposée. Faraday avait obtenu déjà un résultat à peu près semblable, seulement un peu plus fort.

Restait donc à savoir comment le courant agissait dans la double décomposition d'un équivalent d'eau et de sel. Pour cela, Daniell imagina de placer dans le même circuit où se trouvait le voltamètre à double cellule chargé d'une dissolution saturée de sulfate de soude, du chlorure de plomb tenu en fusion dans un tube au moyen d'une lampe à alcool; un fil de platine servait d'électrode négatif au chlorure et un petit bâton de plombagine d'électrode positif. Or, le fil de platine, qui pesait avant l'expérience 5 gr. 44, acquit un poids de 27 gr. 1, ce qui fait pour le plomb seul, qui formait un bouton bien net adhérent au fil, un poids de 21 gr. 66. Dans le voltamètre, il y avait eu décomposition à la fois d'une quantité d'eau et d'une quantité de sulfate de soude équivalente, chacune séparément, au poids du chlorure de plomb décomposé. Cette expérience nous montre donc clairement qu'on ne peut admettre qu'il y ait à la fois électrolysation directe d'un équivalent d'eau et d'un équivalent de sel par la même force qui électrolyse un équivalent de chlorure de plomb. A l'appui de cette conclusion, nous noterons encore le fait suivant, c'est que si l'on prend une lame d'étain pour électrode positif dans le voltamètre à double cellule, qu'on charge ce voltamètre d'une dissolution de chlorure de sodium, et qu'on le mette dans le circuit toujours avec le chlorure de plomb, on trouve que la perte en poids de l'étain qui est attaqué par le chlore et le volume de l'hydrogène dégagé à l'électrode négatif de platine où se porte aussi la soude, représentent la décomposition d'une quantité de chlorure de sodium exactement équivalente à la quantité du chlorure de plomb décomposée. La seule manière de se rendre compte de ce résultat est d'admettre que le chlorure de sodium dissous est seul décomposé, que le chlore est absorbé par l'étain, et que le sodium porté à l'électrode négatif réagit sur l'eau,

s'oxyde en dégageant son équivalent d'hydrogène, qui n'est plus qu'un produit secondaire dû à un effet purement chimique, et non à l'électrolysation directe de l'eau.

Nous sommes ainsi conduits à considérer comme un principe fondamental que la force électrique que nous mesurons par son action définie en un point quelconque du circuit, ne peut pas décomposer plus d'une proportion équivalente dans un autre point du même circuit, de sorte que le courant que nous avons mesuré par son électrolysation sur le chlorure de plomb ne peut pas être en même temps suffisant pour électrolyser un équivalent de chlorure de sodium et un équivalent d'eau dans le même voltamètre entre les mêmes électrodes. Il résulte de cette manière de voir que, dans la décomposition du sulfate de soude dissous, il faut admettre que le sulfate seul également est décomposé, et non l'eau; que l'oxygène de l'oxyde de sodium se rend avec l'acide sulfurique à l'électrode positif où il se dégage, pendant que le sodium est porté à l'électrode négatif où il décompose l'eau, et devient de la soude en dégageant son équivalent d'hydrogène, qui n'est plus également qu'un produit secondaire. Avec les sels dont la base métallique, telle que le plomb ou le cuivre, est incapable de décomposer l'eau aux températures ordinaires, le métal pur se trouve déposé à l'électrode négatif: ce dépot est un effet direct de la décomposition, et il n'est point dû, comme on l'a longtemps prétendu, à la réduction de l'oxyde par l'hydrogène provenant de l'électrolysation de l'eau qui aurait lieu en même temps que celle du sel. Des expériences directes faites en remplaçant la dissolution de sulfate de soude par celle de sulfate de cuivre dans le circuit où est le chlorure de plomb fondu, confirment cette explication qui est complétement d'accord avec les idées de Davy et de Dulong sur la composition des sels, qu'ils regardent comme des composés binaires analogues aux chlorures. Ainsi, de même qu'un chlorure de sodium est un composé d'un équivalent de chlore et d'un équivalent de sodium, un sulfate de soude est un composé d'un équivalent d'*oxy-sulfion* et d'un équivalent de sodium, un équivalent d'oxy-sulfion étant formé d'un équivalent d'oxygène et d'un équivalent d'acide

sulfurique. Nous voyons donc que, d'après les expériences de Daniell, les idées de Faraday sur les actions secondaires dues à la décomposition directe de l'eau dans les dissolutions, doivent être modifiées, comme nous l'avons fait pressentir.

Nous venons d'établir avec Faraday la loi de l'action définie du courant, et avec Daniell celle de la décomposition immédiate des sels dissous dans l'eau. Maintenant, avant de voir si la loi de Faraday s'étend à toutes les classes de composés, et si, en particulier, elle s'applique à ceux dans la composition desquels il entre plus d'un équivalent de l'un des éléments constituants, occupons-nous de savoir comment s'opère la décomposition quand deux ou plusieurs électrolytes sont mélangés.

M. Matteucci, le premier après Faraday, avait, par de nombreux travaux, suivi cet ordre de recherches. Après avoir démontré que la loi de l'action définie du courant régit aussi bien l'action chimique qui a lieu dans l'intérieur de la pile entre les couples, que celle qui a lieu entre les pôles, point important pour la théorie de la pile, il avait constaté que l'électrolyse des combinaisons des oxydes avec des acides donne le même équivalent de métal que celle des oxydes mêmes, aussi bien quand ces combinaisons sont dissoutes dans l'eau que lorsqu'elles sont liquéfiées par la chaleur; ce qui est d'accord avec les résultats obtenus plus tard par Daniell.

En effet, partant de la loi trouvée par Faraday que les oxydes, les chlorures, les iodures, et en général les combinaisons binaires, sont décomposées dans leurs équivalents, M. Matteucci avait voulu déterminer ce qui arriverait quand ces combinaisons seraient du second ordre, c'est-à-dire des sels. En conséquence, il avait soumis successivement à l'action du courant de l'acétate de plomb, soit fondu, soit dissous, en ayant soin de placer en même temps dans le circuit un voltamètre à eau acidulée. Pour 6 cc. du mélange gazeux qui correspond à 3 mg., 2214 d'eau décomposée, il avait obtenu 37 mg. de plomb à l'électrode négatif, aussi bien dans l'acétade fondu que dans le dissous, ce qui correspond à 1287 pour l'équivalent du plomb, nombre très-rapproché de celui qui est adopté par les chimistes. Il avait fait la même expérience sur le nitrate d'argent, et il avait

trouvé, pour 6 cc. de mélange gazeux dans le voltamètre, 39 mg. d'argent, ce qui correspond à 1356 pour l'équivalent d'argent; le nitrate fondu et le nitrate dissous donnèrent le même résultat. Le borate neutre de plomb fondu avait donné pour 6 cc. du mélange, 37 mg. de plomb à l'électrode négatif comme l'acétate.

Le métal réduit n'est donc point l'effet d'une action secondaire provenant de la décomposition de l'eau; il est évident que les sels sont décomposés directement aussi bien quand ils sont amenés à l'état liquide par leur dissolution dans l'eau que quand ils y sont amenés par l'effet de la chaleur. La différence donc qui existe entre un oxyde et un sel, c'est que, tandis que pour tous les deux également il y a un équivalent de métal transporté à l'électrode négatif, il y a pour le sel un équivalent d'acide transporté à l'électrode positif avec un équivalent d'oxygène. M. Matteucci s'en est assuré d'une manière certaine en prenant pour électrolytes des benzoates neutres de potasse, de chaux, de zinc, de plomb et d'argent, qui sont tous plus ou moins solubles dans l'eau, tandis que l'acide benzoïque lui-même est insoluble. Cet acide pouvait donc facilement être recueilli à l'électrode positif sur du papier joseph, puis convenablement lavé et desséché. On le pesait, et on obtenait pour son poids un nombre à peu près égal à son équivalent, ce dont il était facile de s'assurer en recueillant et mesurant les autres produits de la décomposition, c'est-à-dire l'oxygène et la base du sel; seulement une petite quantité d'acide benzoïque disparaissait par l'effet de l'eau qui en dissout un peu; aussi le nombre obtenu était légèrement inférieur à l'équivalent.

M. Matteucci a également étendu la loi de Faraday au cas du mélange de deux électrolytes, en montrant que s'ils sont décomposés tous les deux, la somme des quantités de chacun d'eux qui sont décomposées est équivalente à la quantité qu'on obtient en en décomposant un seul par un courant de même force et de même durée, ce qui prouve que, dans ce cas encore, l'action chimique du courant est définie. Quant à la proportion de chacun des électrolytes qui est décomposée, elle dépend de leur nature et de la proportion même dans laquelle ils entrent dans le mélange. Ainsi, avec des solutions peu étendues d'a-

cides hydrochlorique, hydriodique, de chlorures et d'iodures, ces composés seuls étaient décomposés, tandis que l'eau l'était aussi si on augmentait sa proportion dans la dissolution et la force du courant.

M. Becquerel père, qui s'était aussi occupé de la décomposition des mélanges, avait cru y trouver un moyen de mesurer les affinités. Ayant mêlé ensemble du nitrate d'argent et du nitrate de cuivre dans une proportion telle qu'il y eût le même nombre d'équivalents de chacun, il avait observé que le nitrate d'argent seul était décomposé; de même, dans un mélange semblable de nitrate de plomb et de nitrate de cuivre, le nitrate de cuivre seul était décomposé. Mais si l'on augmentait dans le mélange la proportion de celui des deux nitrates qui n'était pas décomposé, il arrivait un moment où il l'était aussi. Ainsi, en opérant sur une dissolution qui renferme un équivalent de nitrate d'argent égal à 1 décigramme, il faut ajouter 67 équivalents de nitrate de cuivre pour qu'il y ait à l'électrode négatif un précipité métallique composé d'un équivalent de chacun des deux métaux. M. Becquerel en tire la conclusion qu'alors le courant se partage en deux parties parfaitement égales entre les deux nitrates, puisqu'il produit sur chacun d'eux le même effet chimique et qu'il y surmonte des résistances égales qui sont les affinités existantes entre les parties constituantes des deux sels. C'est en augmentant la masse, c'est-à-dire le nombre des particules exposées à l'action du courant de celui des nitrates qui est le moins décomposable, qu'on arrive à cette égalité d'effets électrolytiques, d'où M. Becquerel conclut qu'on doit trouver dans le rapport des masses nécessaires, pour qu'il y ait un équivalent de chacun décomposé, la mesure des forces qui unissent l'oxygène et l'acide nitrique à un équivalent d'argent et de cuivre. Nous ne saurions nous ranger à cette conclusion, parce que, sans nier que l'affinité puisse jouer un rôle dans le résultat obtenu, il est incontestable que la conductibilité relative des deux nitrates mélangés y a une part bien plus grande, et que ces deux propriétés semblent être indépendantes l'une de l'autre.

Cette influence de la conductibilité dans les phénomènes ob-

servés par M. Becquerel se trouve confirmée par les recherches que M. Matteucci a également faites, mais en suivant une autre méthode, pour trouver le rapport qui peut exister entre l'électrolysation de certaines combinaisons et l'affinité chimique des éléments dont elles sont formées. Nous avons déjà vu[1] qu'il était arrivé à montrer que tous les composés qui, fondus et anhydres, conduisent mieux le courant que l'eau, sont toujours plus conducteurs que leurs solutions aqueuses, même les plus concentrées, et que, pour que deux solutions aqueuses de deux composés aient la même conductibilité, il faut que celle dont le composé est le moins conducteur à l'état de fusion soit la plus concentrée. Or, en opérant de la même manière, il a trouvé que ce qui est vrai pour la conductibilité est vrai aussi pour l'électrolysation. Ainsi, si l'on place deux voltamètres parallèles dans le même circuit qu'un voltamètre ordinaire à eau acidulée, on trouve, par exemple, qu'un équivalent de nitrate d'argent d'une part et 4 équivalents de nitrate de plomb d'autre part ajoutés à 100 gr. d'eau donnent deux solutions également électrolysables; on a pour 12 cc. de mélange gazeux dans le voltamètre principal, 40 mg. de plomb et 38 mg. d'argent dans chacun des deux autres. Il faut de même $2\frac{1}{2}$ équivalents de nitrate de cuivre et 1 de nitrate d'argent pour avoir deux liquides également électrolysables. Dans tous les cas, il va sans dire que la somme des équivalents des deux métaux est égale à l'équivalent d'hydrogène dégagé dans le voltamètre principal mis toujours dans le circuit. On voit que les proportions trouvées par M. Matteucci sont bien différentes de celles de M. Becquerel, ce qui prouve que l'action mutuelle des deux sels mélangés exerce une influence sur le résultat. Le dissolvant en a aussi, quoique le corps dissous soit seul décomposé; deux solutions de nitrate d'argent de même densité, l'une dans l'alcool, l'autre dans l'eau, renfermant par conséquent, la première, beaucoup plus de nitrate que la seconde, en étant placées chacune dans un des voltamètres partiels, donnent, la première, 57 mg. d'argent, la seconde 56, nombres presque

[1] Tome II, pages 61 et suivantes.

égaux, et dont la somme correspond aux 18 cc. du mélange gazeux provenant de la décomposition de l'eau dans le voltamètre principal. Les deux solutions sont donc également électrolysables, et cependant elles contiennent dans le même volume des quantités de nitrate d'argent très-différentes, ce qui fait qu'elles ont la même densité.

Pour comparer l'électrolysation des différents composés, M. Matteucci procède toujours de la même manière, savoir, en plaçant dans le circuit un voltamètre principal rempli d'eau acidulée avec l'acide sulfurique au maximum de conductibilité (1,232 de densité); puis, à la suite parallèlement l'un à l'autre, de manière que le courant puisse se partager entre eux, un second voltamètre semblable au premier, et la substance dissoute ou fondue soumise à l'expérience. Quand cette substance est du protoxyde ou de l'iodure de plomb, du chlorure ou du nitrate d'argent, elle transmet tout le courant, et il n'en passe point par le voltamètre secondaire : avec le chlorure ou l'acétate de plomb, il y a une décomposition dans le voltamètre secondaire, plus forte avec l'acétate qu'avec le chlorure, ce qui indiquerait qu'il est moins électrolysable. En remplaçant le voltamètre secondaire par l'acétate de plomb fondu, on trouve, avec l'oxyde de plomb mis parallèlement, pour 12 cc. du mélange gazeux dans le voltamètre principal, 9 à 10 mg. dans l'acétate et 60 dans l'oxyde; avec le nitrate d'argent, 4 mg. de plomb dans l'acétate et 70 dans le nitrate. Ainsi l'oxyde de plomb libre est plus électrolysable que ce même oxyde combiné avec l'acide, et le nitrate d'argent l'est encore plus. En comparant successivement les chlorures de plomb et d'argent à l'acétate, on trouve 10 mg. de plomb dans l'acétate, et par conséquent 60 environ dans le chlorure, tandis qu'avec le chlorure d'argent l'acétate n'est point décomposé. L'iodure de plomb donne à peu près le même résultat que le chlorure et l'oxyde, ce qui prouve que certains composés sont également électrolysables. Par contre, si on place parallèlement avec l'acétate de plomb du protochlorure d'étain, on a toujours pour 12 cc. du mélange gazeux dans le voltamètre principal, 64 mg. de plomb dans l'acétate, et à peine 3 mg. d'étain dans le protochlorure.

M. Matteucci conclut de tous ces faits que les composés se laissent d'autant plus facilement décomposer, que l'affinité chimique qui réunit leurs éléments est moins forte, ce qui est contraire à l'opinion de Faraday, qui estime au contraire que les composés les plus électrolysables sont ceux dont les éléments ont le plus d'affinité. Quant à nous, nous ne saurions voir dans ces divers phénomènes qu'un résultat de la résistance plus ou moins grande que les divers liquides présentent à la transmission du courant, et par conséquent à leur électrolysation; propriétés dont on ignore la liaison, si tant est qu'elle existe; c'est même un point sur lequel les conjectures diffèrent du tout au tout, puisque nous voyons Faraday et Matteucci avoir à cet égard des opinions diamétralement opposées. Toutefois il semblerait que les combinaisons, telles que l'eau pure, dont les éléments ont le plus d'affinité les uns pour les autres, seraient bien ceux qui ont le moins de pouvoir conducteur, et qui sont par conséquent le moins électrolysables.

Une autre question qui se présente ici est de savoir si les composés formés de la combinaison d'un équivalent avec deux ou plusieurs équivalents sont décomposables comme ceux qui résultent de la combinaison d'un équivalent avec un seul équivalent, et, dans le cas où ils seraient décomposables, quelle est la loi qui régit leur électrolysation. Deux physiciens, MM. Matteucci et E. Becquerel, ont également étudié ce point important.

M. Faraday avait cru que les seuls composés décomposables par le courant étaient ceux qui sont formés de la combinaison d'un équivalent d'un élément avec un seul équivalent d'un autre, non pas qu'ils le soient tous nécessairement, puisqu'il en est plusieurs, tels que le chlorure de soufre, le protochlorure de phosphore, celui de carbone, qui ne le sont pas, n'étant pas conducteurs; mais Faraday entendait que ceux-là seulement auraient été susceptibles d'être électrolysés, tandis que les composés formés d'un équivalent avec deux ou plusieurs équivalents ne seraient ni conducteurs ni électrolysables; deux seulement seraient conducteurs exceptionnellement, le périodure et le perchlorure de mercure; mais, tout en conduisant le courant, ils ne seraient pas décomposés par lui. M. Mat-

teucci, examinant de plus près ce point, est parvenu cependant à décomposer les combinaisons dans lesquelles il entre plus de deux équivalents. Les corps sur lesquels ont porté ses expériences ont été le protochlorure d'antimoine et les deux chlorures de cuivre. Le premier a pu être placé à l'état de fusion dans le circuit avec un voltamètre, et l'expérience a donné un dégagement de chlore à l'électrode positif, et de 8 mg. d'antimoine au négatif pour un dégagement gazeux de 6 cc. dans le voltamètre qui correspond à 3 mg. 22 d'eau décomposée[1]. Or ces 8 mg. d'antimoine ne représentent que le $\frac{1}{3}$ du nombre qui est l'équivalent de ce métal pour un équivalent d'eau décomposée. Quant aux deux chlorures de cuivre, comme ils attaquaient les électrodes d'or et de platine, il a fallu les dissoudre dans l'eau; on en a fait des dissolutions très-concentrées, et on a pu constater, en comparant leur électrolyse avec celle de l'eau du voltamètre, qu'ils étaient bien décomposés directement, d'autant mieux qu'on n'avait que du chlore, et point d'oxygène à l'électrode positif. On a obtenu à l'électrode négatif un équivalent de cuivre avec le protochlorure, mais seulement un demi équivalent avec le bi-chlorure.

M. E. Becquerel, en opérant sur les chlorures dissouts, aussi bien celui d'antimoine que celui de cuivre, a obtenu pour les derniers le même résultat que M. Matteucci; mais, pour le premier, il a trouvé qu'il se dépose à l'électrode négatif les $\frac{2}{3}$ de l'équivalent d'antimoine. Il attribue la grande différence qu'il y a entre son résultat et celui de M. Matteucci à ce que, dans les expériences de ce dernier physicien, le chlore attaque et redissout une partie de l'antimoine. Pour être à l'abri de cet inconvénient, M. E. Becquerel a disposé son appareil de manière à mettre les deux électrodes dans deux vases différents remplis de la même solution, en faisant communiquer les deux liquides à l'aide d'un petit syphon qu'on amorce quand les vases sont rem-

[1] Dans une expérience subséquente, M. Matteucci avait trouvé pour 9cc 45 de mélange gazeux dans le voltamètre, 13mg 5 d'antimoine. Il est aussi parvenu quelquefois à un nombre plus considérable, et reconnaît qu'on a besoin de nouvelles expériences pour bien établir la loi de la décomposition de ce corps très-difficile à électrolyser directement.

plis. Dans la figure ci-jointe (237), les deux verres sont placés sur le plateau d'une machine pneumatique et recouverts d'une cloche munie d'un robinet et percée de deux ouvertures qui

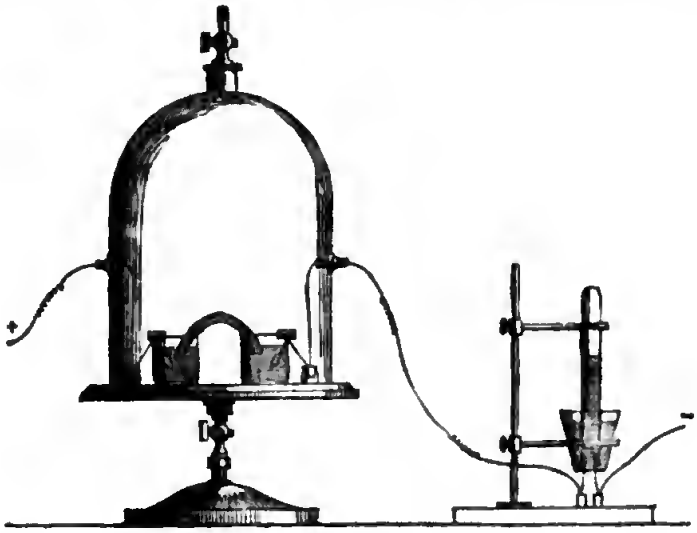


Fig. 237.

permettent d'introduire par chacune un fil métallique dans la cloche, afin de mettre dans le circuit, au moyen de deux petits godets remplis de mercure, les lames décomposantes. L'électrode négatif est de platine, et le positif peut être de différents métaux. L'appareil communique avec un voltamètre placé en dehors de la cloche, car celle-ci sert à faire le vide pour protéger les liquides électrolytiques altérables à l'air et pour les placer dans un autre milieu gazeux. Dans le cas où l'on opère sur des chlorures fondus, et non dissous, on ne peut employer cet appareil, car il faut maintenir les deux électrodes au milieu de la masse et opérer rapidement. Voici deux expériences faites de cette manière par M. E. Becquerel :

GAZ DÉGAGÉ dans le voltamètre à 0° et 0m,76.	POIDS de l'eau décomposée.	ANTIMOINE à l'électrode negatif.
	Mill.	gr.
49.00	21.48	0.106
91.14	48.94	0.232

Or, l'équivalent de l'antimoine est 806,45, celui de l'eau étant 112,5; pour qu'il se déposât un équivalent d'antimoine, il faudrait qu'il y eût au pôle négatif, dans la première expérience, $21,48 \times \frac{806,45}{112,5} = 153^{\text{mill.}},80$, et dans la deuxième expérience, $48,94 \times \frac{806,45}{112,5} = 350^{\text{mill.}},4$. Si l'on prend les $\frac{2}{3}$ de ces deux nombres, on trouve $0^{\text{gr.}},102$ et $0^{\text{gr.}},233$, nombres donnés par l'expérience.

Les expériences qui précèdent, ainsi que celles faites sur quelques autres chlorures, soit simples, soit composés, tels que le bichlorure d'étain et le perchlorure de fer, ont conduit M. E. Becquerel à admettre que, pour un équivalent d'eau décomposée, ou, ce qui revient au même, pour un équivalent d'électricité employée, c'est toujours un équivalent de chlore qui est dégagé à l'électrode positif, et par conséquent une quantité correspondante de la base à l'électrode négatif. C'est pourquoi, avec les chlorures d'argent, d'étain, de fer, on a un équivalent du métal pour un équivalent de chlore, de même avec le bichlorure de cuivre, tous ces chlorures renfermant 1 équivalent de chlore et 1 équivalent de métal; mais avec le protochlorure de cuivre, qui contient 2 équivalents de cuivre pour 1 de chlore, on a 2 équivalents à l'électrode négatif pour 1 de chlore au positif; avec le perchlorure de fer et le perchlorure d'antimoine, qui renferment chacun 2 équivalents de métal pour 3 de chlore, ou, ce qui revient au même, $\frac{2}{3}$ d'équivalent du métal pour 1 de chlore, on n'a à l'électrode négatif que les $\frac{2}{3}$ de l'équivalent du métal pour un équivalent de chlore au positif.

M. E. Becquerel croit pouvoir étendre la loi qu'il a trouvée pour les chlorures aux iodures et aux bromures, ainsi qu'aux oxydes et aux sels, de sorte que c'est toujours un équivalent de l'élément acide (composé, dans le cas des sels, d'un équivalent d'oxygène et d'un équivalent d'acide) qui se rend à l'électrode positif et une quantité correspondante de base au négatif. C'est en opérant sur les sels de plomb, tels que les nitrates, les nitrites et les hyponitrites, qu'il a constaté l'existence de la loi pour les sels; il l'a aussi vérifiée avec deux sels de cuivre sou-

mis à l'action du même courant, et dont l'un, l'hyposulfite de protoxyde de cuivre, a donné 53 mill. de cuivre à l'électrode négatif, tandis que du nitrate de bioxyde de cuivre, mis dans le même circuit, n'a donné que 26 mill., c'est-à-dire moitié moins ; il a obtenu le même résultat avec le protoxyde et le bioxyde de cuivre dissous dans l'ammoniaque.

Nous devons reconnaître que, malgré les travaux de MM. Matteucci et E. Becquerel, il y a encore bien à faire pour découvrir le mode exact d'action de l'électricité sur les composés dans la formation desquels entre plus de deux équivalents ; malheureusement, le nombre de ces composés, qui sont conducteurs et susceptibles d'être électrolysés, est fort peu considérable. Il y en a même, parmi ceux dont M. E. Becquerel a fait usage, qui, tels que le bichlorure d'étain, ne conduisent pas le courant, lors même qu'ils sont fondus ; et si à l'état de dissolution ils deviennent conducteurs, ce ne peut être que parce qu'ils ont éprouvé quelque altération en se combinant avec l'eau. On n'est donc pas bien certain que ces chlorures soient décomposés directement, et qu'il ne se passe pas quelqu'une de ces actions secondaires si difficiles à discerner et qui troublent la simplicité des résultats. M. E. Becquerel en signale lui-même des exemples dans la décomposition des nombreux acétates de plomb, qui est presque toujours le résultat d'un effet secondaire.

Nous terminerons ce paragraphe en revenant sur un point sur lequel tous les physiciens qui se sont occupés de l'électrolyse, aussi bien MM. Matteucci et E. Becquerel que M. Daniell, sont d'accord, savoir : la manière d'envisager la décomposition des sels et celle de l'eau acidulée. Quant à celle des sels, nous avons déjà montré que c'est le métal, et non pas l'oxyde, sauf dans quelques cas exceptionnels que nous examinerons dans le paragraphe suivant, qui est transporté à l'électrode négatif. On explique ainsi pourquoi quand on décompose des sels dont les oxydes ne sont pas solubles, tels que ceux de magnésie et de zinc, en plaçant leurs dissolutions à l'électrode positif et en les faisant communiquer par un conducteur humide avec de l'eau distillée où plonge l'électrode négatif, on trouve que la magnésie et l'oxyde de zinc s'arrêtent à leur entrée dans l'eau distillée, où ils restent en sus-

pens, au lieu d'aller jusqu'à l'électrode négatif. Il est clair que le magnésium et le zinc, qui, dans leurs dissolutions salines, étaient transportés du pôle + au pôle —, en échangeant, conformément à la théorie de Grotthus, de molécule à molécule leur oxygène et leur acide, de manière à toujours former un sel soluble, ne trouvent plus, en arrivant dans l'eau, que de l'oxygène sans acide ; ce n'est donc plus un sel, mais un oxyde qu'ils forment, et comme cet oxyde n'est pas soluble, il ne va pas plus loin : c'est alors l'hydrogène de la première molécule d'eau qu'a rencontrée le magnésium ou le zinc qui voyage à leur place par voie d'échange de molécule à molécule jusqu'à l'électrode négatif. Supposons, par exemple (fig. 238),

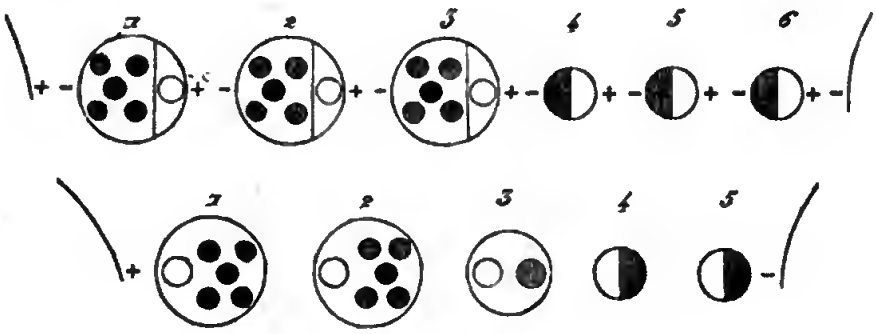


Fig. 238.

six molécules consécutives, dont les nos 1, 2 et 3 (sulfate de magnésie) sont composés de 4 équivalents d'*oxygène*, 1 équivalent de *soufre* et 1 équivalent de *magnésium* [1], et les nos 4, 5 et 6 (eau) sont composés de l'équivalent oxygène et de l'équivalent hydrogène : le courant passe, les polarise et les décompose. Les 4 équivalents d'oxygène et l'équivalent de soufre de la molécule n° 1 se dégagent sous forme d'acide sulfurique et d'oxygène à l'électrode positif, et l'équivalent de l'hydrogène de la molécule n° 6 à l'électrode négatif. Le magnésium du n° 1 se combine avec l'*oxy-sulfion* du n° 2, le magnésium du

[1] Les cercles et demi-cercles blancs représentent le magnésium et l'hydrogène, les gris l'oxygène, et les noirs le soufre.

n° 2 avec l'oxy-sulfion du n° 3, le magnésium du n° 3 avec l'oxygène du n° 4, l'hydrogène du n° 4 avec l'oxygène du n° 5, et l'hydrogène du n° 5 avec l'oxygène du n° 6. Il n'y a donc plus que cinq molécules, dont la troisième, l'oxyde de magnésium, reste en suspension dans le liquide. La série inférieure des molécules de la fig. 238 représente ces molécules au moment de l'échange de leurs parties constituantes, et avant qu'elles aient été de nouveau polarisées par le courant comme elles le sont dans la série supérieure. Si l'oxyde est soluble comme celui de sodium ou de potassium, le phénomène a lieu de la même manière; seulement la potasse et la soude se dissolvent à mesure qu'elles arrivent dans l'eau, mais il est bien facile de constater que c'est aux points de contact entre la dissolution saline et l'eau, et non à l'électrode qu'elles se déposent premièrement.

M. E. Becquerel a expliqué d'une façon très-ingénieuse, par la même théorie, la manière dont s'opère la décomposition de l'eau oxygénée, expérience fort intéressante qu'il a faite en mettant l'eau oxygénée dans un petit verre, et en prenant pour électrode positif un fil de platine qui passe dans un tube de verre fermé à la lampe, de sorte que le bout très-fin du fil soit seul employé à décomposer le liquide; on met alors au-dessus de ce fil une petite cloche graduée, et on recueille seulement l'oxygène. Un voltamètre à eau ordinaire est en même temps placé dans le circuit. Voici le résultat comparatif de deux expériences :

	EAU OXYGÉNÉE. Gaz dégagé.	EAU ORDINAIRE. Gaz dégagé.
1re expérience :	18,5 oxygène.	9,3 oxygène. 18,6 hydrogène.
2e expérience :	26 oxygène.	13,2 oxygène. 26,3 hydrogène.

On voit qu'il se dégage dans l'eau oxygénée le double plus d'oxygène à l'électrode positif que dans l'eau ordinaire. Au premier abord, ce résultat semble en opposition avec la loi établie par M. E. Becquerel pour l'électrolyse des composés multiples en vertu de laquelle il y a toujours 1 équivalent d'oxygène, de chlore ou d'acide pour 1 équivalent d'électricité ou

d'eau décomposée ; or on en trouve 2 dans l'eau oxygénée au lieu de 1. Mais si on considère l'eau oxygénée, ainsi que nous l'avons fait pour les dissolutions salines, comme la combinaison d'un équivalent d'eau avec un équivalent d'oxygène, l'équivalent d'oxygène remplaçant celui d'acide, la base, qui est l'hydrogène, va à l'électrode négatif, pendant que les deux équivalents d'oxygène, dont l'un remplace celui d'oxyde, vont à l'électrode positif. Il se passe ici la même chose qu'avec l'eau acidulée, qu'on doit considérer comme un hydrate d'acide sulfurique, par exemple, l'hydrogène de cet hydrate se dégageant à l'électrode négatif pendant que son oxygène et son acide se déposent au positif. C'est ce que démontrent les nombreuses expériences faites sur ce sujet par divers physiciens et notamment par Daniell et Miller[1].

§ 3. Exceptions apparentes aux lois de l'électrolyse et confirmation de ces lois.

Nous venons d'établir la loi de l'action chimique définie du courant, qui consiste en ce qu'une même quantité, soit un équivalent d'électricité, décompose toujours un équivalent d'un électrolyte. Nous avons vu que cette loi, qui est générale quand la combinaison soumise à l'électrolyse ne se compose que de deux équivalents, doit être nécessairement modifiée dans les cas où il entre dans le composé plus d'un équivalent de l'un de ses éléments. Nous avons reconnu que, malgré les travaux de MM. Matteucci et E. Becquerel, un nouvel examen est encore nécessaire pour connaître toutes les modifications que la loi doit subir dans ce cas, et qui sont probablement différentes dans les divers composés à proportions multiples.

Si nous partons de l'idée mise en avant par Faraday que le courant qui agit dans l'électrolyse n'est que *la force chimique mise en circulation et transportée intégralement d'un point à un autre sous forme de courant, et agissant à distance, au lieu de n'agir qu'au contact*, la loi des équivalents électro-chimiques en est une conséquence nécessaire et rigoureuse, car la même force

[1] Voyez pour plus de détails la note finale E.

chimique doit décomposer partout un équivalent du corps composé. Cependant cette loi est souvent dissimulée par une foule de circonstances au milieu desquelles il devient assez difficile de la discerner pour que la généralité en ait été mise en doute. Ainsi on a cru que parmi les corps composés il y en avait qui pouvaient conduire le courant à la façon des métaux, sans être décomposés; on a été conduit à admettre que, dans un très-grand nombre de cas d'électrolyse, les deux pôles avaient une puissance inégale de décomposition et de transport; en un mot, on a signalé bien des anomalies et des exceptions à la loi électrolytique. Mais nous allons, en les étudiant, montrer qu'elles ne sont qu'apparentes et qu'elles peuvent toutes s'expliquer en tenant compte des actions secondaires qui proviennent du dégagement des éléments qui, à l'état naissant, ont une activité chimique toute particulière et des modifications qu'apporte constamment à la nature même de l'électrolyte, qui ne peut par conséquent rester identique, l'apparition des nouvelles substances provenant, soit directement, soit indirectement, de l'électrolyse. C'est surtout aux variations de conductibilité qui résultent pour différentes parties de l'électrolyse de cette apparition, que sont dues les principales anomalies apparentes.

Faraday, le premier, avait lui-même indiqué, comme formant une exception à la loi électrolytique qu'il avait découverte, certains composés, tels que le sulfure d'argent et le biodure de mercure, capables de conduire le courant quand on élevait leur température sans être décomposés. Ces exceptions, et d'autres encore du même genre, ont disparu, grâce aux recherches de M. Hittorff et de M. Beetz. Le premier a trouvé que le sulfure d'argent est décomposé même à la température ordinaire[1]; il se forme à l'électrode négatif une tache brillante d'argent métallique qui demeure toujours assez petite, parce que le soufre déposé à l'électrode positif ne tarde pas à arrêter le cou-

[1] Faraday lui-même, en signalant le fait que la simple élévation de température, provenant du passage du courant, suffisait pour augmenter la conductibilité du sulfure d'argent, observe qu'il se forme à l'électrode positif un léger dépôt (de soufre) qui empêche la transmission du courant et qui ne peut être attribué qu'à la décomposition électro-chimique du sulfure.

rant, à moins que cet électrode ne soit d'argent ou d'un autre métal capable de se combiner avec le soufre. Si l'on opère à une température élevée, le sulfure devient aussi bon conducteur qu'un métal, et cependant, même après une expérience de longue durée, il n'y a qu'une petite quantité de sulfure décomposé, et l'argent réduit est loin d'être équivalent à l'hydrogène dégagé dans un voltamètre placé dans le même circuit. Cela tient à ce que l'argent réduit à l'état métallique par l'électrolyse finit par établir entre les deux électrodes une communication par où le courant passe tout entier. Il est vrai que cet accroissement de conductibilité disparaît quand le sulfure revient à la température ordinaire, mais cet effet est dû à la rupture de la communication métallique par le refroidissement de la masse; il est, en effet, impossible d'admettre que le sulfure puisse, à une température élevée, transmettre le courant sans être décomposé; car si l'on prend pour électrode positif une plaque de zinc, ou de tout autre métal qui ne puisse se combiner avec le soufre, il se dépose toujours du soufre à cet électrode, quelle que soit la température à laquelle se fait l'expérience; le sulfure d'argent ne cesse donc jamais d'être décomposable par le courant, et le grand accroissement de conductibilité qu'il présente à de hautes températures, quand l'électrode positif est d'argent ou de platine, ne tient qu'à l'établissement d'une communication métallique directe entre les deux électrodes. Le sous-sulfure de cuivre et le proto-sulfure d'étain présentent les mêmes phénomènes que le sulfure d'argent. M. Hittorff, en opérant sur le premier de ces sulfures mis à l'abri du contact de l'air, a observé que sa conductibilité s'accroît rapidement à mesure que la température s'élève, et a reconnu que lorsque le courant l'a traversé pendant quelque temps, il y a du cuivre libre à l'électrode négatif, et que le soufre dégagé au positif a fait passer le sous-sulfure à l'état de monosulfure. La formation de ce monosulfure qui est conducteur, et la manière dont le cuivre se dépose à l'électrode négatif en minces filaments qui s'avancent vers le positif, diminuent notablement la longueur de la colonne de sulfure traversée réellement par le courant, et expliquent l'accroissement considérable de con-

ductibilité qui se manifeste et qui n'est détruit qu'en partie quand on revient à la température ordinaire.

M. Beetz, de son côté, a constaté, comme M. Hittorff l'avait fait pour le sulfure d'argent, que le biiodure de mercure est décomposé par le courant dès qu'il est capable de le transmettre. Dans ce but, après avoir purifié ce composé par une double sublimation, il l'a introduit dans un tube de verre qu'il avait desséché, et dont il avait fermé les deux bouts à la lampe après y avoir introduit deux fils de platine pour mettre le biiodure dans le circuit où il avait également placé un galvanomètre à une seule aiguille peu sensible et un voltamètre chargé d'un sel d'argent. Le biiodure était chauffé dans un bain de sable ; à 100° il commença à devenir conducteur. En même temps qu'il acquérait la couleur jaune et qu'il éprouvait un commencement de fusion, des traces de décomposition devinrent sensibles par la propriété qu'acquirent les électrodes de platine de donner eux-mêmes naissance à un courant, propriété nommée polarisation, et dont nous parlerons dans le paragraphe suivant. Le biiodure étant devenu tout à fait liquide, M. Beetz y fit passer un courant pendant quatorze heures, ayant soin de maintenir la même température ; pendant tout ce temps, l'aiguille du galvanomètre conserva la même déviation, et on trouva à la fin de l'expérience 0gr., 162 d'argent réduit au voltamètre. Toutefois le tube qui renfermait le biiodure ayant été brisé, on n'aperçut aucune trace de mercure au fil négatif, mais la masse était devenue noire autour du fil positif, et en en jetant quelques fragments sur un papier imprégné d'amidon, on vit paraître la couleur violette qui indiquait la présence de l'iode pure, tandis qu'il se trouvait du protoiodure à l'électrode négatif. Il était difficile de déterminer exactement la proportion d'iode dégagée ; cependant M. Beetz put juger approximativement qu'elle était inférieure à ce qu'elle aurait dû être d'après la quantité de l'argent réduit dans le voltamètre ; ce qui tient probablement à ce qu'une partie de l'iode se recombine avec le protoiodure qui existe toujours mélangé avec le biiodure, et même avec celui que produit l'électrolyse. Le fluorure de plomb avait été également cité par Faraday comme un

exemple des corps composés qui peuvent devenir très-conducteurs par la simple élévation de température, même avant d'être fondus, et sans éprouver de décomposition. M. Beetz a constaté d'une manière positive que ce composé est électrolysé dès que le courant le traverse. En effet, les lames de platine qui servent à le mettre dans le circuit sont polarisées comme avec le biiodure, et à mesure qu'il entre en fusion, on voit des bulles d'un gaz incolore se dégager à l'électrode positif qui est en même temps fortement attaqué, et une masse grisâtre qui est un alliage de plomb et de platine se former au négatif. L'aiguille du galvanomètre placée dans le circuit garde la même déviation pendant tout le temps que dure l'électrolysation du fluorure, et la quantité de l'argent réduit dans le voltamètre comparée au poids du plomb obtenu, indique que le fluorure de plomb obéit à la loi des équivalents électro-chimiques.

Nous avons déjà mentionné dans le premier chapitre la propriété que possède le verre de devenir conducteur quand on le chauffe. M. Beetz s'est assuré, en opérant sur des verres de différentes qualités, et en particulier sur le verre soluble de Fuchs, qu'ils deviennent conducteurs entre 200 et 220°, et que les fils de platine au moyen desquels ils sont mis dans le circuit sont fortement polarisés, ce qui prouve l'existence de l'électrolyse. Nous verrons plus tard des preuves encore plus directes de cette décomposition dans l'emploi qu'a fait M. Buff du verre fondu comme liquide conducteur interposé entre les couples d'une pile.

Mais de toutes les anomalies que présentent les phénomènes de l'électrolyse, ceux qui ont le plus attiré l'attention des physiciens, et qui ont paru, au premier abord, échapper le plus aux lois générales qui régissent ce mode d'action, c'est l'inégalité de part respective dans la production des éléments transportés aux deux électrodes, que semblent avoir, dans bien des cas du moins, les deux portions de l'électrolyte dans lesquelles plongent chacun des électrodes. MM. Daniell et Miller avaient observé les premiers, en se servant de l'appareil composé de deux cellules séparées par une membrane, et remplies l'une d'eau acidulée, l'autre d'une dissolution de sulfate de cuivre ou de

sulfate de zinc, que lorsque l'électrode positif plonge dans la dissolution de sulfate et le négatif dans l'eau acidulée, on n'a que de l'oxygène et de l'hydrogène pour produits de la décomposition, tandis qu'en changeant les électrodes de place on a de l'oxygène à l'électrode positif et le métal au négatif ; dans les deux cas, un équivalent d'acide sulfurique se trouve avec l'oxygène à l'électrode positif. Si on remplit les deux cellules également de sulfate de cuivre ou de zinc, on s'assure facilement, en analysant après l'expérience les liquides contenus dans chaque cellule, que tout le cuivre ou tout le zinc déposé à l'électrode négatif provient uniquement du sulfate contenu dans la cellule où plonge cet électrode.

Parmi les expériences de Daniell et Miller, nous citerons encore celles dans lesquelles du sulfate de potasse et du sulfate de magnésie ayant été mis successivement dans la cellule positive, on n'obtint que $\frac{1}{3}$ de l'équivalent de potassium et que $\frac{1}{18}$ de celui de magnésium. L'alumine, la magnésie ou l'oxyde de cuivre ne se rendent en aucune proportion à l'électrode négatif plongé dans une dissolution acide, quand ils forment avec la potasse un sulfate double, dont la dissolution est mise en communication avec l'électrode positif.

Dans tous les phénomènes que nous venons de décrire, la membrane qui sépare le vase en deux compartiments n'a aucune influence sur les résultats ; aussi peut-on la remplacer par un simple tube en syphon rempli de liquide, qui établit la communication entre les deux compartiments positif et négatif. C'est en se servant d'un mode de communication analogue qu'a opéré M. Pouillet quand il a trouvé une anomalie du même genre que celles que nous venons de décrire, dans la décomposition du chlorure d'or. Il plaçait la dissolution de ce chlorure dans une série de tubes en U dont la partie inférieure, plus étroite, ne permettait pas aux liquides qui remplissaient les deux branches parallèles de se mêler facilement. (Fig. 239.)

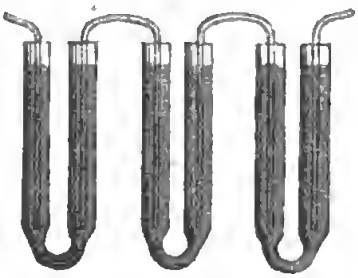


Fig. 239.

En unissant les colonnes liquides des tubes successifs par des fils de platine, et en faisant communiquer les colonnes extrêmes, l'une avec l'électrode positif, l'autre avec le négatif, il a remarqué que lorsque le courant avait passé pendant un certain temps, toutes les branches négatives des tubes étaient moins colorées que les positives, que de l'or s'était déposé dans le fil négatif sans trace de dégagement d'hydrogène, et que du chlore s'était dégagé sans oxygène autour du fil positif. Il était facile de constater que, tandis que le liquide de la branche positive contenait autant de chlorure d'or qu'au commencement de l'expérience, celui de la branche négative en avait perdu une quantité précisément correspondante au poids de l'or déposé. Il semblerait en résulter que la puissance décomposante appartient exclusivement à l'électrode négatif.

M. Hittorff est parvenu à un résultat encore plus général en montrant que la proportion du métal réduit par l'électrolysation, qui est fournie respectivement par la partie du liquide en contact avec l'électrode négatif et par celle où plonge le positif, demeure la même pour une même dissolution, quelle que soit la force du courant, mais varie avec la nature et le degré de concentration de cette dissolution. L'appareil dont il a fait usage se compose, comme celui de Daniell, d'un vase en verre cylindrique séparé en deux compartiments, non par un diaphragme poreux, mais par une rondelle de verre d'un diamètre moindre que celui du vase, de façon qu'il reste entre le bord de cette rondelle et la paroi intérieure du vase une couche liquide que le courant peut traverser. Le vase tout entier est rempli de la même dissolution, l'électrode positif plongeant dans l'un des compartiments et le négatif dans l'autre ; l'appareil est disposé de façon qu'on puisse le séparer en deux pièces correspondantes aux deux compartiments, et à ce qu'au moyen d'un obturateur en verre qu'on introduit entre elles il soit facile de conserver, sans qu'ils se mélangent, les liquides contenus dans chacun. Le vase cylindrique est placé verticalement ; l'électrode positif logé dans sa partie inférieure est fait dans chaque cas du même métal qui sert de base au sel soumis à l'électrolysation ; le negatif est d'argent et a la forme d'un petit cône dont le

sommet est en haut, afin de mieux retenir le dépôt métallique. Après chaque expérience on pèse ce dépôt, puis on détermine le poids du métal perdu par la portion de liquide renfermée dans le compartiment négatif; on retranche ce second poids du premier, ce qui donne la quantité de métal qui, fournie par le compartiment positif, a été transportée de l'électrode positif au négatif. Le rapport entre cette quantité et la quantité totale du métal déposé indique la proportion de métal transportée.

Voici d'abord les résultats obtenus avec des dissolutions de cuivre à divers degrés de densité :

DENSITÉ de LA DISSOLUTION.	QUANTITÉ DE SULFATE DE CUIVRE par rapport à l'eau.	PROPORTION de CUIVRE TRANSPORTÉ.
1.0521	1 sulfate de cuivre pour 6.35 eau.	27.6 pour 100
1.0353	1 » pour 18.08 »	34.5 pour 100
1.0254	1 » pour 39.67 »	35 pour 100

On a opéré exactement de la même manière sur des solutions d'acétate, de nitrate et de sulfate d'argent, et on a trouvé, à la suite d'un grand nombre d'expériences faites avec beaucoup de soin, que la proportion transportée de l'électrode négatif au positif avait été, pour

L'acétate de. . . . 62,6 pour 100
Le sulfate de. . . . 44,6 pour 100
Le nitrate de. . . . 47,4 pour 100

Il est à remarquer que, quoique les quantités absolues fussent quelquefois très-différentes d'une expérience à l'autre, les rapports variaient très-peu de ceux indiqués ci-dessus, qui sont la moyenne des résultats obtenus pour chaque sel. La durée de l'expérience n'était point toujours la même, mais il n'en résultait pas de changement appréciable dans la valeur des rapports trouvés. Quand le métal, dans son dépôt l'électrode négatif,

est accompagné d'un dégagement d'hydrogène, on peut être certain qu'une partie tout au moins de ce métal est à l'état d'oxyde ; c'est ce que M. Hittorff a vérifié en employant pour électrolyte une dissolution bien neutre de sulfate de fer : le poids du fer déposé à l'électrode négatif s'est trouvé supérieur à celui qui résultait en vertu de la loi des équivalents de la décomposition du nitrate d'argent placé dans le même circuit; en effet, en précipitant par l'ammoniaque, après l'avoir dissous dans l'eau régale, le dépôt de fer qui pesait 1gr.,3625, on trouva que le fer proprement dit n'entrait dans ce poids que pour 0gr.,9542, nombre bien peu différent de 0gr.,9537, calculé d'après l'équivalent d'argent déposé par le même courant.

Un fait encore assez important à noter, c'est que lorsque le nitrate d'argent est dissous dans l'alcool au lieu de l'être dans l'eau, ce qui le rend beaucoup plus mauvais conducteur et fait durer l'opération beaucoup plus longtemps, on ne trouve que 43 pour cent d'argent, transporté de l'électrode positif au négatif, au lieu de 47 pour 100.

Les faits divers que nous venons de rapporter ne prouvent, suivant nous, ni une différence de pouvoir dans les pôles, comme le croit M. Pouillet, ni, comme semblent le présumer MM. Daniell et Hittorff, une faculté de transport variable avec la nature de la combinaison soumise à l'électrolysation, et dépendante jusqu'à un certain point de l'affinité qui unit ses éléments. Ils sont uniquement l'effet de la non homogénéité des liquides soumis à l'expérience, d'où résulte que le courant ne décompose pas seulement le sel dissous, mais décompose aussi l'eau plus ou moins acidulée qui se trouve dans la dissolution. M. d'Almeida a fait voir, en effet, que dans l'électrolysation d'un sel dissous, le dépôt du métal, du cuivre, par exemple, à l'électrode négatif, peut provenir de deux sources, ou de l'électrolyse directe du sel, ou d'une action secondaire, savoir la réduction opérée au moyen de l'hydrogène naissant dû à la décomposition de l'eau. Si la dissolution est parfaitement neutre, et surtout si elle reste neutre pendant toute la durée de l'expérience, le métal déposé à l'électrode négatif provient presque entièrement de la décomposition directe du sel ; si la

dissolution est acidulée, l'hydrogène naissant est la cause principale de la réduction du sel.

M. d'Almeida a vérifié l'exactitude de sa règle générale en opérant sur des dissolutions de nitrate d'argent et de cuivre, de sulfate de cuivre, d'argent et de zinc; il y a seulement une très-grande difficulté à maintenir une dissolution neutre pendant toute la durée de l'électrolyse. La dissolution soumise à l'expérience, par exemple, une dissolution neutre de nitrate d'argent, est placée dans deux vases distincts qui communiquent entre eux par une très-petite ouverture, comme dans les tubes de M. Pouillet (fig. 239). Dans l'un des vases plonge une lame de platine servant d'électrode négatif, dans l'autre une lame d'argent, qui est l'électrode positif. Le courant passe pendant 28 heures; au bout de ce temps, on trouve 140 millig. d'argent déposés à l'électrode négatif, et l'analyse montre que 73 de ces 140 proviennent de la dissolution qui environne cet électrode et 67 de l'autre vase; dans ce cas, la dissolution est aussi neutre que possible, et elle est entretenue à cet état par l'électrode positif en argent qui se combine à mesure avec l'acide nitrique qui s'y porte. Si la dissolution est légèrement acide, on trouve que les 140 millig. déposés à l'électrode négatif ont été en entier enlevés à la dissolution placée dans le vase où plongeait cet électrode. Il est évident que, dans le premier cas, la décomposition du nitrate d'argent s'est opérée presque uniquement par voie d'électrolyse, puisque, comme cela doit avoir lieu dans ce mode, d'après la théorie de Grotthus, les éléments déposés aux deux électrodes ont été fournis également par les parties de la dissolution en contact avec chacun d'eux. Dans le second cas, au contraire, l'eau acidulée qui est dans la dissolution étant plus conductrice que le nitrate, c'est elle qui est décomposée, et son hydrogène naissant produit la réduction du sel à l'électrode négatif, ce qui fait que le métal réduit est fourni uniquement par le liquide en contact avec cet électrode. M. d'Almeida s'est assuré en effet directement que l'eau acidulée, telle qu'elle se trouve dans la dissolution du nitrate, conduisait mieux le courant électrique que cette dissolution à l'état de neutralité.

La même chose se passe dans toutes les expériences que nous avons citées dans ce paragraphe, et en particulier dans celles de M. Pouillet et de M. Hittorff. Ainsi, dans les premières, c'est l'acide hydrochlorique, qui se trouve toujours dans la dissolution du chlorure d'or, qui est décomposé plutôt que le chlorure qui est plus mauvais conducteur; le chlore se dégage à l'électrode positif, et l'or du chlorure qui entoure l'électrode négatif est réduit par l'hydrogène naissant. Il résulte de cette réduction la formation constante de l'acide hydrochlorique, qui remplace ainsi celui qui est décomposé.

Dans les expériences de M. Hittorff, les effets observés sont mixtes; une partie du métal réduit provient de l'électrolyse directe du sel, et l'autre de la réduction par l'hydrogène dû à la décomposition de l'eau acide que renferment les dissolutions des sels métalliques si rarement et si difficilement neutres. Ce qui prouve l'exactitude de cette explication, c'est que plus la dissolution de cuivre est étendue, plus la proportion de cuivre réduit directement par l'électrolyse devient considérable, parce qu'on diminue la force de l'eau acidulée. Il n'est pas certain non plus que, quoique l'électrode positif soit en cuivre, dans un sel de cuivre, et en argent dans un sel d'argent, l'acide accumulé autour de cet électrode soit en totalité neutralisé par le métal; il est probable, au contraire, qu'il en reste dans la dissolution à l'état libre, et alors c'est l'eau acidulée qui est décomposée, et son hydrogène contribue en partie à la réduction du métal. En effet, ainsi que le prouvent les résultats numériques consignés plus haut, la proportion du sulfate d'argent décomposée par l'électrolyse directe est moindre que celle du nitrate, qui est presque en entier décomposé de cette manière, parce que l'acide sulfurique dégagé à l'électrode positif échappe en plus grande quantité que le nitrique à la combinaison avec l'argent. Le seul fait assez singulier, c'est que, avec l'acétate d'argent, la proportion d'argent fournie par le compartiment positif soit plus considérable que celle qui est fournie par le négatif lui-même. Il est probable qu'il y a là quelque mélange des liquides contenus dans les deux compartiments, qu'il en passe en particulier de l'électrode positif au

négatif une petite quantité qui augmente ainsi la proportion du sel d'argent qu'on trouve dans le compartiment négatif. Ce mélange doit provenir essentiellement de la différence de densité des liquides, et peut-être aussi d'un transport mécanique qui n'a lieu d'une manière sensible que lorsque le liquide est conducteur imparfait, ce qui est le cas ici, et ce qui fait durer l'expérience deux fois plus de temps qu'avec les dissolutions de nitrate et de sulfate. Au reste, cette double origine du métal déposé à l'électrode négatif dans l'électrolyse des sels se reconnaît à l'apparence même du dépôt, qui est très-différente, suivant que le métal provient de l'électrolyse ou de la réduction par l'hydrogène. C'est ce qu'il est facile de constater en se servant de dissolutions plus ou moins acides et plus ou moins épuisées de sulfate de cuivre et de nitrate d'argent. Ainsi M. Smee a vu, en décomposant du sulfate de cuivre au moyen d'un courant de 2 couples, le premier dépôt de cuivre être brillant, uni et ductile, c'est celui qui provenait exclusivement de l'électrolysation; le second était un peu cassant, c'est qu'il y avait déjà mélange du cuivre provenant de l'électrolyse et de celui réduit par l'hydrogène; enfin le troisième était comme du sable, puis spongieux, il n'y avait à peu près plus que le cuivre réduit par l'hydrogène; et enfin l'hydrogène gazeux lui-même finissait par paraître; la liqueur, évidemment, ne renfermait presque plus de sulfate, et était devenue trop acide; et cependant l'électrode positif était de cuivre. Nous reviendrons sur ce sujet, et en particulier sur le travail de M. Smee, en nous occupant dans notre sixième partie des applications métallurgiques de l'électricité, pour lesquelles ces questions ont une très-grande importance, comme on peut le comprendre par l'exemple du cuivre que nous venons de donner.

Toutefois, nous remarquerons encore que l'explication par laquelle M. d'Almeida rend si bien compte de l'apparente inégalité d'électrolysation autour des deux électrodes, s'applique aussi bien, ainsi qu'il l'a remarqué lui-même, au cas des sels alcalins et terreux qu'à celui des sels métalliques, et qu'elle y trouve même une confirmation remarquable. Ainsi, si après avoir versé des quantités égales de nitrate de potasse dans les

deux vases de ses expériences précédentes, il rend acide la dissolution où plonge l'électrode positif, il trouve qu'après la décomposition il n'y a eu qu'une très-faible proportion de cette partie de la dissolution qui ait été décomposée, le courant ayant passé de préférence à travers l'eau acidulée; c'est au contraire, dans le vase négatif, que la décomposition du sel a été le plus faible si on a rendu fortement alcaline la dissolution de ce vase. Maintenant, ce qu'on fait artificiellement, s'opère naturellement par l'électrolyse même du sel qui rend acide la dissolution positive, et alcaline la négative; mais comme en général l'acide des sels dissous (nitrates, sulfates) est beaucoup plus conducteur que leurs bases, soude, potasse, etc., il en résulte que le sel doit subir, et subit en effet, une décomposition moins abondante dans la partie de la dissolution où est l'électrode positif, qui est celle où se rend l'acide. Mais si le sel reste neutre pendant toute la durée de l'expérience, les dissolutions positive et négative fournissent également leur part à l'action électrolysante. Pour obtenir cette neutralité, M. d'Almeida, s'il s'agit, par exemple, du sulfate de potasse, verse d'avance de la potasse dans le vase positif et de l'acide sulfurique, en quantité équivalente, dans le négatif, avec des volumes égaux de la dissolution saline; puis il fait durer la décomposition jusqu'à ce que les quantités d'acide et de base, introduites primitivement, se retrouvent en excès du côté opposé où elles avaient été versées. Par ce procédé, chacune des tranches est alcaline pendant la moitié de l'expérience et acide pendant l'autre moitié; l'influence de l'acide et de l'alcali est donc également exercée des deux côtés au moment où l'on arrête la décomposition; c'est comme si la dissolution était restée neutre tout le temps.

Il serait inutile de revenir actuellement sur les nombreuses expériences que Daniell et Miller ont faites avec l'appareil à diaphragmes sur les décompositions des sels terreux et alcalins, des phosphates en particulier. Nous nous bornerons à remarquer qu'elles sont toutes favorables à la théorie que nous avons donnée sur la composition des sels, et en particulier à celle de Graham sur les phosphates, dans laquelle il fait jouer

à l'eau le rôle d'une base, et quant aux différentes proportions fournies par les deux compartiments dans les produits de l'électrolyse, l'explication de M. d'Almeida s'y applique parfaitement bien.

L'étude que nous venons de faire des formes si variées, et en apparence quelquefois si complexes sous lesquelles se présente la décomposition électro-chimique, tout en nous permettant de ramener ces formes aux lois simples de Davy et de Faraday, ne nous en montre pas moins la difficulté qu'il y a à découvrir ces lois au milieu de tant de causes de perturbation. Aussi est-il nécessaire de se mettre à l'abri de l'action de ces causes pour établir sur des bases solides la généralité de la loi de l'action définie du courant, qui a été niée par plusieurs physiciens. C'est ce qu'ont fait successivement M. Buff et M. Soret dans des recherches conduites avec un soin et une précision remarquables.

M. Buff a eu surtout pour but de vérifier l'exactitude de la loi électrolytique dans les cas de très-faibles courants et par conséquent d'actions très-prolongées, cas dans lesquels la décomposition est souvent peu apparente et où par conséquent il faut beaucoup de temps pour en découvrir et en apprécier l'effet, ce qui fait que bien des physiciens avaient contesté non-seulement l'existence de la loi, mais même celle de l'électrolyse, lorsque l'électricité transmise n'atteint pas un certain degré d'intensité. M. Buff avait eu d'abord en vue de déterminer le rapport de l'action électrolytique à la force du courant. Le liquide soumis à la décomposition était une solution de nitrate d'argent neutre d'une parfaite pureté. Deux lames d'argent y étaient plongées, en sorte que sous l'influence du courant il se détachait de l'une de l'argent qui allait se porter sur l'autre. Il se servait dans ses expériences d'un couple de Daniell, de manière à conserver une force presque constante pendant plusieurs jours. Il faisait varier la force du courant en introduisant dans le circuit des fils de longueur variable qui servaient en même temps de fils à des galvanomètres multiplicateurs de manière qu'au moyen de la déviation produite sur l'aiguille, on pouvait constater le degré de constance du courant. Les fils étaient au nombre de deux et suivant qu'ils étaient

placés dans le circuit l'un à la suite de l'autre, qu'un seul s'y trouvait ou que tous les deux étaient disposés l'un parallèle à l'autre, on obtenait trois courants dont l'énergie relative peut être représentée par 1, 2 et 4. La résistance des fils était assez grande pour que celle de la pile réunie à celle de l'auge de décomposition ne pût en être qu'une petite fraction. Il résulte du tableau des expériences faites en grand nombre que toujours le poids du dépôt d'argent a été proportionnel à la force et à la durée du courant. M. Buff a également mis dans le circuit du couple constant deux auges successives remplies de la même solution d'argent; les deux fils de résistance étaient ajustés bout à bout; les électrodes, au nombre de quatre, étaient des lames d'argent fin. Le courant est demeuré en activité sans interruption pendant neuf jours environ, soit 12,539 minutes. Au bout de ce temps on a trouvé :

	Dans la 1re auge	Dans la 2e auge.
Perte de poids de la lame positive. . .	267mm,0	267mm,6
Augmentation de la lame négative. . .	266 ,6	267 ,4

La solution d'argent renfermait 25 milligrammes de nitrate d'argent neutre dans un centimètre cube; une solution plus étendue qui renfermait seulement 10 milligrammes par centimètre cube fut mise à la suite de la première. Au bout de cinquante et une heure et demie, la lame d'argent négative avait augmenté en poids de 124,66 milligrammes dans la solution la plus concentrée, et de 124,16 dans la plus étendue. Ainsi le fait que la solution soit plus ou moins étendue n'exerce aucune influence sur la loi électrolytique.

En remplaçant l'une des solutions d'argent par de l'eau pure on obtient au bout de quatre jours, soit 5,470 minutes, une augmentation de 24 milligrammes à la lame négative qui plonge dans la solution d'argent et une couche d'oxyde d'argent sur la lame positive d'argent plongée dans l'eau, qui, enlevée avec soin, détermine une perte de poids de cette lame de 24 milligrammes. Ainsi l'effet de l'électrolysation de l'eau, même par de très-faibles courants, est semblable à celui de l'électrolysation de la solution d'argent, et cependant on aurait

cru à l'œil que l'eau n'était pas décomposée. Il en est de même avec l'eau légèrement aiguisée par l'acide sulfurique.

Enfin, l'électrolysation du sulfate de cuivre a présenté à M. Buff un accord parfaitement satisfaisant avec celle du nitrate d'argent, pourvu que la solution fût parfaitement pure et dépouillée de tout excès d'acide. Il est donc bien établi par les expériences de M. Buff qu'on peut constater que les courants même les plus faibles, si leur action est suffisamment prolongée, décomposent les liquides électrolytiques suivant la loi de l'action définie de Faraday, et qu'il ne paraît pas que, même dans la plus minime proportion, ils traversent ces liquides sans les décomposer.

C'est aussi sur des sels de cuivre, soit purs, soit mélangés avec d'autres, que M. Soret a vérifié la loi de Faraday. Il a commencé par préparer ces sels de manière à les avoir aussi purs et aussi neutres que possible par une série de cristallisations et de dissolutions successives. Il opérait ses décompositions en plaçant ses solutions dans des tubes et en employant pour électrodes des fils de platine de 1 mil. à 1 mil. $\frac{1}{2}$ de diamètre. Son courant était produit par des piles de Bunzen de 2 à 5 couples faiblement chargés. Quand il estimait que l'action avait été suffisamment prolongée, il enlevait les électrodes recouverts de cuivre, les plongeait pendant quelque temps dans l'eau distillée pour les laver, puis les desséchait rapidement avec du papier joseph et les pesait; il dissolvait ensuite le dépôt de cuivre dans l'acide nitrique, et pesait de nouveau les fils de platine pour avoir le poids du cuivre déposé. Il est nécessaire, pour obtenir de bons résultats, que le dépôt de cuivre soit uni et compacte; autrement on risque qu'une partie du cuivre ne se détache ou ne s'oxyde. M. Soret n'a pas trouvé d'avantage à employer du cuivre au lieu de platine pour électrode positif, la dissolution de ce cuivre ne se faisant pas toujours d'une manière normale, et des expériences délicates ne lui ayant pas indiqué de différences sensibles dans la quantité de cuivre déposé suivant que la dissolution était neutre ou acide [1].

[1] M. Jacobi, à la suite de nombreuses expériences et en se servant d'électrodes

En effet, trois expériences ont fourni les résultats suivants :

	POIDS DU CUIVRE DÉPOSÉ DANS LE SULFATE DE CUIVRE.		DIFFÉRENCES.
	Neutre.	Acide.	
1re expérience.	0g.1663	0g.1664	+0.0001
2e expérience.	0g.1353	0g.1355	+0.0002
3e expérience.	0g.3360	0g.3362	+0.0002

Après avoir vérifié par de nombreux essais que, dans des circonstances identiques, deux dissolutions parfaitement semblables de sulfate de cuivre donnent des dépôts égaux à 2 ou 3 dixièmes de milligrammes près, il a trouvé qu'il en était de même pour deux dissolutions, l'une saturée, l'autre étendue. Mais si les deux dissolutions, tout en étant semblables, sont à des températures différentes, l'une à 20°, l'autre à 100°, par exemple, cette dernière donne un dépôt de cuivre sensiblement moindre, ce qui tient, ainsi qu'on peut s'en assurer directement, à l'action dissolvante du sulfate de cuivre à 100°, même neutre, sur le cuivre métallique.

Du nitrate, du phosphate et de l'acétate de cuivre ont été mis concurremment avec le sulfate dans le circuit : chacune de ces dissolutions a donné dans chaque cas le même dépôt de cuivre à l'électrode négatif que le sulfate. Les différences sur des pe-

en cuivre, avait renoncé à se servir de la décomposition du sulfate de cuivre pour déterminer l'intensité du courant, à cause des nombreuses anomalies que cette décomposition lui avait présentées. Ainsi en additionnant les poids de cuivre perdus d'un côté et réduits de l'autre, il avait trouvé dans une série d'expériences, 7,4962 de cuivre perdu pour 7,1743 de cuivre réduit ; ce qui fait une différence de 4,5 pour 100. M. Jacobi reconnaît lui-même que cette anomalie tient à ce que les expériences ont été faites avec du sulfate de cuivre du commerce, qui n'est pas pur ; cette explication se trouve amplement justifiée par les résultats qu'a obtenus M. Soret en employant du sulfate de cuivre chimiquement pur. En effet, dans ce cas, peu importe que la solution devienne acide ou reste neutre, la quantité de cuivre déposée à l'électrode négatif devant pour un même courant demeurer la même, qu'elle provienne de l'électrolyse directe ou de la réduction par l'hydrogène.

sées de 1 à 2, et même à 4 ou 5 décigrammes, étaient en moyenne de 2 dixièmes de milligrammes, tantôt dans un sens, tantôt dans un autre, et n'ont jamais dépassé 4 dixièmes, sauf dans un seul cas où la différence s'est élevée à 6 dixièmes. Il faut seulement ne pas trop prolonger l'action avec le nitrate pour ne pas libérer beaucoup d'acide nitrique, cet acide exerçant bientôt une action dissolvante sur le cuivre déposé, et il faut que l'acétate soit très-concentré, le dépôt de cuivre, sans cela, n'étant pas compacte et les différences étant trop grandes.

Le sulfate de cuivre et le sulfate de potasse, mélangés à volumes égaux, forment une dissolution qui donne le même dépôt que le sulfate de cuivre pur. Le bichromate de potasse mélangé avec le sulfate de cuivre ne forme aucun dépôt, mais donne seulement un dégagement de gaz. Le mélange du sulfate de cuivre et du borate de soude donne un dépôt de cuivre, mais ce dépôt est toujours un peu plus considérable que ceux obtenus simultanément dans le sulfate de cuivre pur, et les différences sont trop grandes de 3 à 7 milligrammes pour pouvoir être attribuées à des erreurs d'expériences. Le dépôt n'est d'ailleurs jamais compacte et paraît du reste un peu oxydé, ce qu'il doit à sa forme légèrement spongieuse. Le sulfate de protoxyde de fer mélangé au sulfate de cuivre diminue sensiblement le dépôt du cuivre, ce qui tient à ce que le cuivre se dissout dans le sulfate de fer au maximum et à ce qu'il se forme toujours une certaine quantité de ce sulfate quand on laisse le sulfate de protoxyde de fer exposé à l'air; formation qui doit être facilitée par le dégagement d'oxygène et d'acide libre qui accompagne l'électrolyse. Le sulfate de manganèse produit le même effet que le sulfate de protoxyde de fer. Le nitrate de cobalt, les sulfates de zinc et de cadmium n'altèrent nullement le poids du dépôt de cuivre, et on ne trouve pas trace dans ce dépôt de cobalt, de zinc et de cadmium, ce qui prouve bien que le cuivre seul se dépose. Voici le tableau des résultats comparatifs obtenus par le passage du même courant dans une dissolution saturée de sulfate de cuivre servant de terme de comparaison, et dans une autre dissolution.

NOM DE LA DISSOLUTION comparée AU SULFATE DE CUIVRE.	POIDS DU CUIVRE DÉPOSÉ DANS le sulfate de cuivre à saturation.	POIDS DU CUIVRE DÉPOSÉ DANS la dissolution inscrite à la 1re colonne.	DIFFÉRENCE.
	gr.	gr.	gr.
Sulfate de cuivre étendu de ½ volume d'eau.	0.3391	0.3397	+0.0006
Sulfate de cuivre étendu de 1 volume d'eau.	0.1786	0.1782	—0.0004
Sulfate de cuivre étendu de 1 volume d'eau.	0.8319	0.3315	—0.0004
Sulfate de cuivre étendu de 1 volume d'eau.	0.2577	0.2580	+0.0003
Azotate de cuivre concentré.	0.2838	0.2837	—0.0001
Azotate de cuivre concentré.	0.4900	0.4898	—0.0002
Azotate de cuivre concentré.	0.1265	0.1259	—0.0006
Phosphate de cuivre dissous dans l'acide phosphorique.	0.1805	0.1809	+0.0004
Phosphate de cuivre dissous dans l'acide phosphorique.	0.1207	0.1210	+0.0003
Phosphate de cuivre dissous dans l'acide phosphorique.	0.1389	0.1388	—0.0001
Acétate de cuivre.	0.0842	0.0841	—0.0001
Acétate de cuivre.	0.0807	0.0809	+0.0002
Mélange de sulfate de cuivre et de sulfate de potasse.	0.2040	0.2039	—0.0001
Mélange de sulfate de cuivre et de sulfate de potasse.	0.1195	0.1199	+0.0004
Mélange de sulfate de cuivre et d'azotate de cobalt.	0.0886	0.0883	—0.0003
Mélange de sulfate de cuivre et d'azotate de cobalt.	0.0834	0.0835	+0.0001
Mélange de sulfate de cuivre et de sulfate de zinc.	0.1358	0.1456	+0.0003
Mélange de sulfate de cuivre et de sulfate de zinc.	0.1009	0.1011	+0.0002
Mélange de sulfate de cuivre et de sulfate de cadmium.	0.1280	0.1282	+0.0002

Nous pouvons donc conclure de ces dernières expériences que la loi des équivalents électro-chimiques se trouve justifiée dans les limites des erreurs d'observation, et que, s'il y a une proportion d'électricité qui traverse le liquide sans produire de décomposition, elle ne peut être qu'une fraction très-petite,

$\frac{1}{500}$ au plus de la quantité totale d'électricité transmise; en effet, si elle était de $\frac{1}{500}$ ou moins, les différences qui en résulteraient seraient évidemment plus petites que les erreurs d'observation[1].

§ 4. Influence des électrodes sur les décompositions électro-chimiques.

Il existe encore une circonstance qui, indépendamment de son effet propre et distinct, joue également un rôle important dans celles que nous venons d'énumérer, je veux parler de la nature, de la forme et de l'état physique des électrodes qui établissent la communication entre les pôles de la pile et le liquide à décomposer. L'influence de cette portion du circuit est trop générale et trop considérable pour que nous ne devions pas l'étudier de très-près et chercher à l'apprécier.

Nous avons déjà vu qu'il existe toujours dans le passage du courant d'un conducteur solide dans un liquide une résistance indépendante de la conductibilité propre du corps solide et du corps liquide. Cette résistance se manifeste d'une manière très-prononcée quand on sépare un conducteur liquide en deux parties par une lame mince de métal, ou quand on réunit deux liquides conducteurs placés dans deux vases distincts où plongent chacun des électrodes, par un arc métallique. En plaçant un galvanomètre et un voltamètre dans le circuit, il est facile de constater que plus le métal dont sont faits la lame ou l'arc métallique est attaquable par les liquides en contact avec eux, moins la résistance est grande. Elle varie également avec la nature relative du métal et des liquides, lors même que ce métal n'est attaquable par aucun des liquides. Ainsi, avec des lames de platine employées, soit comme électrodes, soit pour établir les communications entre deux ou plusieurs vases successifs, la résistance est beaucoup moindre avec l'acide nitrique concentré qu'avec l'hydrochlorique, avec l'hydrochlorique qu'avec le sulfurique; elle est plus considérable avec l'acide

[1] Nous verrons dans le § 4 qu'on ne peut admettre dans les liquides composés que l'électricité soit transmise autrement que par voie d'électrolyse.

nitrique étendu qu'avec le concentré, tandis que c'est l'inverse avec l'acide sulfurique; les solutions salines, celles de potasse et d'ammoniaque, présentent à peu près la même résistance. L'intensité du courant exerce une influence non-seulement sur la résistance absolue, mais aussi sur la résistance relative de deux liquides; ainsi, quand le courant est fort, la résistance au passage est moindre pour l'acide hydrochlorique que pour l'acide nitrique; c'est l'inverse quand le courant est faible. Pour bien s'assurer que ces différences dépendent de variations dans les résistances au passage, et non dans la conductibilité du liquide, on se sert de plusieurs verres, quatre, par exemple, remplis du liquide; on les réunit par des arcs de platine pendant que les électrodes de platine plongent dans les deux vases extrêmes. Il est assez curieux de voir qu'en variant le nombre des verres, et par conséquent celui des alternatives ou des passages d'un conducteur solide à un liquide, et réciproquement, on peut rendre le même système de conducteurs métalliques liquides plus ou moins conducteur qu'un autre, ce qui tient tout simplement à ce qu'on modifie par une variation dans le nombre des alternatives l'intensité générale du courant. Tel est le cas, comme nous l'avons dit, avec les acides hydrochlorique et nitrique. Ainsi, en faisant de ces deux acides deux systèmes parfaitement semblables, communiquant chacun avec l'un des fils d'un galvanomètre différentiel, on trouve, en obligeant le courant à se partager entre eux, 48° en faveur de l'acide hydrochorique, quand il n'y a qu'une alternative, et 15° en faveur de l'acide nitrique, quand il y en a cinq. Mais, dans le premier cas, l'intensité du courant transmis par l'un des systèmes tout seul était de 75°, dans le second de 30°. On obtient le même résultat avec deux électrodes en platine employés, soit dans l'acide nitrique, soit dans l'hydrochlorique, et en faisant varier l'intensité du courant par le moyen d'une pile plus ou moins forte.

La résistance au passage diminue avec l'augmentation de la surface de contact du liquide et du conducteur solide, mais on s'assure que la plus grande intensité du courant qui résulte de l'augmentation de la surface de contact, croît dans un rapport

plus grand que la surface elle-même quand le courant est faible, et dans un rapport moindre quand le courant a un certain degré d'intensité, ce degré dépendant de la nature relative des conducteurs solide et liquide.

Avant de nous étendre davantage sur cet ordre de phénomènes, il est nécessaire d'en chercher la cause; or, elle est tout entière dans la décomposition chimique opérée par le courant sur le liquide en contact avec le conducteur solide d'où il sort. Pour bien se représenter le rôle de l'électrode dans l'électrolyse, il faut considérer, comme le fait Faraday, l'ensemble du circuit et cette puissance, dont nous avons déjà parlé, que possède le courant de transporter la force d'affinité qui s'exerce ordinairement à des distances infiniment petites; or, cette force part des électrodes, dont l'un attire l'oxygène et les éléments acides, et l'autre l'hydrogène et les éléments basiques.

Deux circonstances peuvent favoriser l'exercice de la force, et par conséquent le passage du courant, savoir : la facilité que possède en lui-même l'électrolyte à être décomposé, et l'affinité même de la substance dont l'électrode est fait pour celui des éléments de l'électrolyte que le courant tend à dégager sur sa surface [1]. Ainsi, avec des électrodes de platine, l'acide nitrique concentré offrira moins de résistance au passage que l'acide sulfurique étendu ou que l'acide hydrochlorique, parce qu'il se décompose plus facilement que les deux autres acides. Mais, d'un autre côté, comme le platine a de l'affinité pour le chlore, il se pourra que cette circonstance l'emporte sur la première, comme l'expérience nous montre que cela a lieu pour une certaine intensité du courant. Cet effet est encore bien plus sensible quand on emploie pour électrodes positifs des métaux oxydables, tels que le fer, le zinc, etc., et pour électrodes négatifs des peroxydes qui ont une grande affinité pour l'hydrogène, tels que le peroxyde de plomb, dont on peut recouvrir la lame de platine. Il est évident que l'oxygène et l'hydrogène,

[1] Nous ne parlons ici que du passage du courant à la surface de contact de l'électrode et du liquide, et non à travers le liquide lui-même, ce dernier passage dépendant de la conductibilité du liquide, propriété dont le rapport avec l'électrolysation n'est pas encore déterminé.

par exemple, sont tirés avec bien plus de force, l'un dans un sens, l'autre dans l'autre, quand à l'action du courant s'ajoute l'affinité de l'électrode. Mais la manière dont l'influence de la nature des électrodes se fait le plus sentir, c'est en facilitant ou en empêchant le dépôt qui se forme toujours plus ou moins à la surface de chacun d'eux, et qui est la cause la plus réelle de la résistance au passage. Ainsi il est facile de voir que dans l'électrolyse de l'eau acidulée avec des électrodes de platine, il reste une couche mince d'oxygène adhérente à la surface de l'électrode positif et une semblable d'hydrogène à la surface de l'électrode négatif; ces deux couches, en empêchant le contact immédiat des électrodes avec le liquide, nuisent à la facilité de passage du courant, en même temps qu'elles en diminuent l'intensité, comme nous allons le voir, en produisant un courant secondaire dirigé en sens contraire du courant principal. Il n'en est plus de même quand l'électrode, se combinant avec l'oxygène, forme un oxyde soluble ou quand, semblable au peroxyde de plomb, il absorbe l'hydrogène en permettant la combinaison de ce gaz avec une partie de son propre oxygène. Quant à l'existence de ces dépôts, dont la nature varie avec celle de l'électrolyte, elle peut être constatée soit directement, soit indirectement par une propriété particulière qu'ils impriment aux électrodes. Examinons successivement ces deux manières de démontrer leur présence.

L'examen attentif des électrodes fait bien vite découvrir à leur surface, quand ils ont été employés à l'électrolyse, les dépôts même gazeux qui y demeurent adhérents. C'est ainsi qu'on s'assure que le courant même le plus faible, tel que celui d'un couple, ne peut traverser un électrolyte, par exemple, l'eau acidulée, sans la décomposer. Le dépôt gazeux est quelquefois si peu apparent, même au microscope, que pour le rendre sensible il faut placer dans le vide l'appareil où se fait la décomposition, et alors on voit des bulles de gaz se détacher de la surface des électrodes de platine, et le galvanomètre qui est dans le circuit éprouve une déviation plus grande, preuve que la couche gazeuse était la cause de la résistance au passage. Quand le dépôt est solide, il est plus facile à apercevoir et le plus souvent il forme, vu son peu d'épaisseur, des couches colorées très-brillantes analo-

gues aux couleurs des lames minces. M. Nobili, qui les a découvertes et désignées sous le nom d'apparences électro-chimiques, en a fait une étude toute particulière. Pour les obtenir, il dispose horizontalement une plaque de platine ou d'argent, ou même d'acier, au fond d'un vase plat; il la recouvre d'une couche mince d'une solution électrolytique. Puis il plonge verticalement dans le liquide au-dessus de la lame une pointe fine de platine, de façon qu'elle ne soit qu'à 1 ou 2 millimètres de distance de cette lame. La pointe et la lame servent alternativement d'électrodes positif et négatif. L'une des plus belles apparences est celle qu'on obtient sur la lame positive avec l'acétate de plomb. Elle est tout à fait semblable aux anneaux colorés de Newton et tout aussi brillante; elle est due à un dépôt très-mince de peroxyde de plomb, substance qui, comme les acides, est transportée au pôle positif. Il ne faut pas prolonger trop l'action ni employer un courant trop fort, de peur que le dépôt devenant trop épais, les couleurs ne disparaissent. Les apparences sont en général plus brillantes sur l'électrode positif; cependant on peut en obtenir de bien prononcées au négatif en employant un courant plus énergique et en mélangeant ensemble deux ou trois solutions. Il est bon, pour pouvoir comparer plus facilement les apparences positives et les négatives, de les produire en même temps sur la même

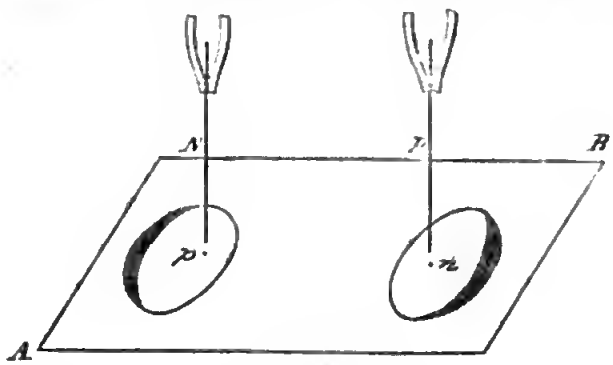


Fig. 240.

plaque; c'est ce que faisait Nobili en disposant au-dessus de la plaque A B deux fils fins de platine communiquant chacun avec un des pôles de la pile N et P (fig. 240). Le courant sortait de la pointe P, pénétrait dans la lame en *n*, puis ressortait de la lame en *p* au-dessous de la seconde pointe N dans laquelle il entrait pour

achever son circuit. Il en résultait la production d'une apparence négative en *n* et d'une positive en *p*. Mais si ces apparences étaient produites de manière à être trop rapprochées l'une de l'autre, elles étaient souvent déformées comme si elles s'étaient repoussées mutuellement et dilatées extérieurement. Cette déformation n'avait plus lieu dès qu'on plaçait entre les deux pointes une mince cloison en verre, de manière à empêcher toute communication directe entre les deux portions du liquide qui recouvrent les parties de la lame où se forment les apparences. Elle était donc évidemment due à ce que, lorsqu'il n'y a pas de cloison en verre, il arrive que parmi les courants qui se disséminent en filets dans tout le liquide entre les deux pointes qui servent de pôles, ceux qui auraient formé le contour intérieur des anneaux colorés cheminent directement d'une pointe à l'autre dans le liquide exclusivement, au lieu de passer dans une partie de leur trajet à travers la lame, et cela à cause de la résistance au passage qu'elle leur présente. Il n'en est pas de même pour les filets extérieurs qui auraient un plus long trajet à faire à travers le liquide; aussi traversent-ils la lame, parce que, malgré la résistance au passage, ce second trajet leur offre une transmission plus facile. Quand il y a la cloison, il n'y a plus de choix et tous les courants sont bien obligés de passer par la lame, ce qui fait que les apparences ne sont plus déformées. Nous voyons par cet exemple que la forme et la position des apparences électro-chimiques peuvent servir d'une manière très-utile à suivre le mode de propagation des courants dans un liquide.

Revenant aux apparences elles-mêmes, nous ajouterons que, parmi les plus belles, se trouvent celles qu'on obtient à l'électrode positif en décomposant des substances organiques végétales ou animales, ce qui avait conduit Nobili à y voir la cause de la coloration des plantes et particulièrement des fleurs. Quant aux dépôts qui naissent de l'électrolyse des composés inorganiques, ils ont été l'objet d'un examen approfondi non-seulement de la part de Nobili, mais aussi de la part de M. Becquerel. Nous aurons occasion de revenir sur les résultats obtenus par ces deux habiles physiciens, en nous occupant des applications chimiques de l'électricité. Il serait inutile d'entrer ici dans plus de

détails, car il est facile de concevoir la variété innombrable d'effets qu'on peut obtenir en employant diverses solutions, soit pures, soit mélangées, en élevant ou abaissant leur température, en produisant les dépôts sur des plaques susceptibles ou non d'être attaquées par les éléments dégagés. Ajoutons seulement que la production des apparences électro-chimiques a été l'objet d'une étude expérimentale et théorique tant de la part de M. E. Becquerel, qui a cru qu'elle était soumise à une loi très-simple analogue à celle qui régit les anneaux colorés de Newton, que de la part de MM. Dubois-Reymond et Beetz, qui ont démontré que le phénomène était plus complexe et dépendait en outre de plusieurs circonstances liées avec les lois de Ohm.

Passons maintenant au mode indirect par lequel on constate la présence des dépôts; il consiste dans la propriété qu'ils impriment aux électrodes de donner naissance à un courant électrique en acquérant ce qu'on nomme une polarité secondaire; par exemple deux lames de platine qui ont servi, l'une d'électrode positif, l'autre d'électrode négatif dans l'eau acidulée, deviennent capables de former un couple voltaïque dans lequel la première lame joue le rôle du métal négatif tel que le cuivre ou le platine, et la seconde, celle du métal positif tel que le zinc. Ce couple produit un courant qui agit sur le galvanomètre et sur les voltamètres chimique et calorifique; il est vrai qu'il n'est jamais très-fort et que son action n'a qu'une très-courte durée. Quand le courant principal a traversé plusieurs diaphragmes ou arcs homogènes destinés à lier les uns aux autres divers compartiments liquides, les polarités secondaires qu'acquièrent ces diaphragmes ou ces arcs en font une véritable pile nommée *pile secondaire*, et dont l'action n'a jamais non plus une bien longue durée. Il n'est pas nécessaire pour que le courant s'établisse que le liquide conducteur dans lequel plongent les métaux polarisés soit le même que celui dont l'électrolysation les a polarisés; preuve que ce courant provient bien des métaux et par conséquent des dépôts qui ont eu lieu sur leur surface. On obtient les mêmes résultats et même à un degré d'intensité plus prononcé par la décomposition des solutions salines. Tous ces courants secondaires sont dus à la réaction

chimique du liquide dans lequel plongent les lames sur les dépôts dont leurs surfaces sont recouvertes; et ce qui le prouve, c'est qu'on obtient les mêmes effets en déterminant les dépôts directement au lieu d'employer pour cela l'action d'un courant[1]. Nous étudierons avec soin la formation de ces courants dans le chapitre consacré à la production de l'électricité par les actions chimiques dont ils sont un cas particulier. Remarquons seulement encore que la polarisation, ou plutôt les polarités secondaires qu'acquièrent les électrodes toutes les fois qu'ils ont transmis de l'électricité dynamique, quelque faible ou instantanée qu'elle soit, sont l'indice le plus sensible de la formation de dépôts à leur surface et par conséquent de l'existence de l'électrolyse.

La résistance au passage est-elle uniquement due à la polarisation des électrodes, ou bien tient-elle aussi au fait même du changement de conducteur? Cette question a été longtemps controversée. Fechner et Poggendorff ont soutenu que les deux causes contribuaient également au phénomène contre Ohm, qui avait établi le premier que le fait seul du passage du courant du conducteur solide au liquide n'engendre pas de résistance, et que celle-ci n'est qu'un effet de la polarisation des métaux. Fechner avait démontré effectivement, par des mesures très-exactes, dans son bel ouvrage publié en 1831[2], que dans un circuit voltaïque fermé où se trouve un électrolyte, mais sans plaques intermédiaires, la résistance totale est toujours plus grande que ne le sont les résistances du métal et du liquide prises ensemble, ce qui prouve l'existence de la résistance au passage; mais il n'avait pas examiné la cause de cette résistance, et il s'était borné à la signaler comme nous l'avions fait M. Marianini et moi en indiquant les circonstances qui la font varier, telles que la nature des métaux et des liquides, et telles encore que la grandeur de la surface métallique immergée dans le liquide et la force du courant, deux influences qui sont en rap-

[1] Il suffit, par exemple, comme Matteucci l'a remarqué le premier, de placer deux lames de platine bien propres, l'une dans de l'oxygène, l'autre dans de l'hydrogène, pour obtenir, en plongeant ensuite les deux lames dans de l'eau acidulée, un courant très-prononcé.

[2] *Maossbestimmungen über die Galwanische-Kette.* Leipsig, 1831.

port inverse avec elle. Il est vrai que Fechner, répondant plus tard aux observations de Ohm, avait cru pouvoir établir, par des considérations tirées de ce que la résistance au passage qui existe dans la pile change avec le temps et de ce qu'elle croît constamment à mesure que l'intensité du courant diminue, la conclusion qu'il existe, indépendamment de l'effet dû à la polarisation, une résistance positive pour le courant quand il traverse des conducteurs alternativement liquides et solides. Mais ce genre d'arguments n'est point concluant, parce que l'effet de la polarisation des électrodes étant essentiellement de créer un courant contraire à celui qui est transmis et de diminuer par là l'intensité de ce dernier, il faudrait, pour pouvoir apprécier exactement l'influence de cette polarisation, connaître le rapport exact qui existe entre le courant secondaire auquel elle donne naissance et le courant primitif qui l'a produite elle-même ; et ce rapport n'est pas connu, ou du moins ne peut être déterminé d'une manière précise.

La seule manière de résoudre la question est de démontrer qu'il n'y a pas de résistance au passage quand il n'y a pas de polarisation des électrodes. Or, pour obtenir cette absence de polarisation tout en transmettant le courant à travers l'électrolyte, il faut se servir de courants instantanés, d'égale intensité, dirigés alternativement en sens contraire et se succédant assez rapidement pour que la polarisation que détermine le premier soit annulée par la polarisation inverse que produit le suivant : que, par exemple, l'oxygène et l'hydrogène amenés alternativement par l'électrolyse de l'eau sur la surface métallique se succèdent assez rapidement pour se recombiner sans se dégager à l'état gazeux ou sans rester adhérents au métal.

J'avais le premier signalé un fait qui indiquait la possibilité de cette neutralisation des polarisations en faisant usage des courants d'induction alternatifs produits par une machine de Saxton, et en les transmettant à travers une solution acide, mise dans le circuit au moyen de deux lames de platine d'une surface égale à celle de la section du liquide, qui était lui-même placé dans une auge prismatique de 4 centimètres carrés de section sur 10 cent. de longueur. Non-seulement on n'apercevait aucun dégagement gazeux sur les électrodes, mais en plaçant comme

diaphragme au milieu du liquide une lame de platine, ou ne diminuait pas l'intensité des courants transmis, et quoique cette lame reçût successivement sur chacune de ses faces l'oxygène et l'hydrogène provenant de la décomposition de l'eau, on ne voyait apparaître aucun gaz. L'intensité des courants était mesurée par un voltamètre calorifique mis dans le circuit, soit l'hélice d'un thermomètre de Bréguet[1], soit un fil fin de platine qui traversait la boule d'un thermoscope à air.

Poggendorff et Vorsellmann de Heer, en répétant et variant mes expériences, étaient parvenus à des résultats contradictoires, le premier ayant cru trouver une résistance au passage indépendante de la polarisation des électrodes et le second l'ayant vu disparaître dès que cette polarisation n'existait plus. Tous les deux faisaient usage des courants d'induction produits par la machine de Saxton. M. Poggendorff mesurait l'intensité des courants au moyen de deux thermomètres à air, dont la boule, plus grosse dans l'un que dans l'autre, était traversée dans chacun par un fil fin de platine; il plaçait un diaphragme métallique au milieu d'une caisse rectangulaire remplie du liquide conducteur, de façon que les deux parties du liquide séparées par le diaphragme ne pussent point communiquer entre elles; enfin il mesurait la résistance que le courant éprouvait par l'interposition du diaphragme en la comparant à celle d'un fil d'argentane de 0,20 millimètre de diamètre. Ajoutons que M. Poggendorff avait soin de faire tourner la machine de Saxton toujours avec la même vitesse, de manière à avoir 15 courants alternatifs par seconde. Un grand nombre d'expériences faites avec des lames de platine, de cuivre et de fer placées dans les mêmes circonstances, tantôt dans l'acide sulfurique étendu, tantôt dans une dissolution d'hydrochlorate de soude, lui avaient donné pour le platine une résistance plus que double que pour le cuivre, et plus que quadruple que pour le fer. M. Poggendorff remarque qu'indépendamment de la nature du liquide et du métal, l'état de la surface de ce dernier influe d'une manière très-notable sur la

[1] Tome I, figure 21.

résistance au passage, aussi bien que l'élévation de température qui la diminue d'une quantité très-considérable; cette diminution ne doit point être confondue avec celle que la chaleur produit dans la résistance de conductibilité du liquide lui-même, qui, ainsi que Ohm l'a démontré, est indépendante des électrodes. Ainsi, avec un diaphragme de platine dans l'acide sulfurique étendu à la température de 17°, le voltamètre calorifique s'élevait de 74 divisions, et il s'élevait de 110 divisions environ quand la température du liquide était portée de 75 à 90°. Si la température du métal est portée jusqu'au rouge, comme dans l'expérience bien connue de Leidenfrost, alors aucun courant n'est transmis, preuve qu'il n'y a pas contact entre le liquide et le métal.

M. Vorsellmann de Heer, pour montrer que la résistance du passage tient à la polarisation des électrodes, se servait de deux galvanomètres, dont l'un, moins sensible, mesurait le courant direct transmis, et l'autre, plus délicat, le courant provenant de la polarisation des électrodes. Or l'intensité de l'un de ces deux courants était inverse de celle de l'autre, preuve donc que la polarisation était la cause qui diminuait le courant principal, et qui produisait par conséquent la résistance au passage. M. Vorsellmann n'employait qu'un seul courant instantané toujours de même intensité, savoir celui qui était produit par une demi-révolution de l'armure de la machine de Saxton, circonstance qui lui permettait de se servir du galvanomètre magnétique pour le mesurer; les électrodes étaient des lames de platine, de cuivre ou de fer bien homogènes, et le liquide de l'eau aiguisée par un peu d'acide sulfurique.

Lenz, qui ne faisait également usage que d'un seul courant instantané, avait toujours trouvé une résistance au passage, ce qui n'est pas étonnant, puisqu'il déterminait toujours ainsi une polarisation des électrodes. Quand on veut démontrer qu'il n'y a pas de résistance au passage proprement dite, il faut parvenir à l'annuler en éloignant les causes qui lui donnent naissance, ou du moins à l'atténuer en diminuant l'effet de ces causes. C'est ce que j'étais parvenu à faire avant même les recherches de MM. Poggendorff et Vorsellmann de

Heer, en me servant, au lieu de courants instantanés ou de courants continus, d'une série de courants dirigés alternativement en sens contraire. Je produisais ces courants non-seulement au moyen de l'appareil d'induction de Saxton, mais aussi en rendant instantanés et alternatifs, au moyen de l'un des rhéotomes ou commutateurs que j'ai décrits dans le volume premier [1], les courants produits par une pile de Daniell de 10 couples. Je me suis d'abord assuré, en plaçant dans le circuit une capsule de platine contenant une couche d'acide nitrique concentré de 1 à 2 centimètres d'épaisseur, dont la surface supérieure était en contact avec un disque également en platine, que les courants discontinus et alternatifs étaient conduits aussi bien, soit qu'ils traversassent la couche d'acide nitrique, soit qu'en mettant en contact la capsule et le disque de platine, on ne les obligeât pas de traverser cette couche. Il n'en était plus de même quand les courants étaient dirigés tous dans le même sens, preuve que la diminution d'intensité qu'ils éprouvaient dans ce dernier cas était due à la polarisation des deux surfaces de platine. Le voltamètre calorifique dont je me servais dans cette expérience était peu sensible; c'est celui qui est fondé sur la mesure de la dilatation éprouvée par un fil de platine que traverse le courant [2]. Avec ce même voltamètre et deux lames de platine de 49 centimètres carrés de surface, plongées à 1 centimètre de distance l'une de l'autre dans de l'acide sulfurique étendu de neuf fois son volume d'eau, j'ai constaté que lorsque le courant était continu et qu'il se dégageait des gaz sur les deux lames, l'instrument marchait de 0° à 17°, et qu'il marchait à 20° dès que le commutateur placé dans le circuit étant mis en mouvement le courant était rendu discontinu et alternatif. Par contre, si, remplaçant dans le circuit le conducteur liquide par un fil de platine d'une résistance à peu près égale, de façon que le voltamètre marchât de 0° à 20° par l'effet du courant continu, je rendais ce courant discontinu et alternatif, l'instrument n'indiquait plus que 17°. Ainsi cette dernière

[1] Tome I, pages 298 et 402.

[2] Tome I, page 30, fig. 19.

forme diminue en fait l'effet du courant, et si elle l'augmente quand il y a un conducteur liquide dans le circuit, c'est qu'elle annule ou diminue la résistance au passage. Voici, du reste, les résultats des expériences faites avec des diaphragmes de différents métaux placés verticalement dans une auge en verre longue de 15 centimètres, large et haute de 3, de manière à diviser le conducteur liquide (acide sulfurique étendu de neuf fois son volume) en deux, trois ou quatre compartiments sans aucune communication directe entre eux; le liquide était mis dans le circuit au moyen de deux lames de platine placées aux extrémités de l'auge. Le voltamètre calorifique est ici un thermoscope à air, dont la boule, placée au haut du tube, est traversée par un fil fin de platine; il porte une division arbitraire en millimètres qui va de bas en haut.

	Courant continu.	Courant alternatif.
Avec un diaphragme de *platine*. . .	68mm	54mm
Sans diaphragme.	48	48
Différence. . .	20	6
Avec trois diaphragmes de *cuivre*. . .	144	128
Sans diaphragme.	133	126
Différence. . .	11	2
Avec trois diaphragmes d'*étain*. . .	127	106
Sans diaphragme.	115	106
Différence. . . .	12	0

Ainsi, pour chaque espèce de diaphragme la résistance au passage est beaucoup moindre avec les courants alternatifs qu'avec les courants continus, et elle finit par devenir nulle avec des diaphragmes d'étain. On peut l'annuler également avec les diaphragmes de cuivre quand ceux-ci ont déjà servi à plusieurs expériences semblables, leurs surfaces présentant alors un aspect pulvérulent qui annonce qu'elles ont éprouvé une série d'oxydations et de réductions. On réussit à la rendre presque insensible avec des diaphragmes de platine, en se servant d'une solution d'hydrochlorate d'ammoniaque, qui fait que le platine est alternativement attaqué et réduit par l'acide hydrochlorique. On obtient le même résultat avec l'acide sulfurique étendu, quand on emploie pour électrodes la capsule et le dis-

que de platine dont j'ai parlé plus haut. En interposant entre cette capsule et ce disque une capsule d'un diamètre moindre, on ne modifie en rien l'intensité des courants alternatifs, qui sont transmis également bien, que la capsule y soit ou n'y soit pas, qu'elle soit en platine, en cuivre ou en étain. Toutefois, ce résultat ne s'obtient avec la capsule de platine que lorsque l'expérience a déjà duré un temps suffisant pour modifier sa surface, tandis qu'avec les deux autres il a lieu immédiatement.

Pour bien réussir dans ces dernières expériences, il faut employer la machine de Saxton, parce qu'on peut faire succéder plus rapidement les uns aux autres les courants dirigés alternativement en sens contraire ; ainsi dans mes dernières expériences il y en avait 40 au moins par seconde ; dans les premières, il n'y en avait que 27, et il n'est pas étonnant que dans celles de Poggendorff, où il n'y en avait que 15, la résistance au passage n'ait jamais été complètement annulée.

Il est évident, d'après ce qui précède, que ce qui produit la résistance au passage d'un conducteur solide dans un liquide, c'est le dépôt sur la surface métallique de l'électrode, des substances étrangères provenant de l'électrolyse, soit que la résistance due à ce dépôt soit uniquement *passive* par l'effet de la moins bonne communication entre le liquide et le métal, soit qu'elle soit aussi *active* par la création d'un courant contraire dû à la polarisation des surfaces métalliques. En tout cas, pour annuler la résistance au passage, il faut empêcher le dépôt de se former ou le détruire aussitôt formé. C'est ce qu'on fait avec les courants alternatifs qui, se succédant très-rapidement, apportent successivement l'oxygène et l'hydrogène sur la même surface dans un intervalle de temps assez court pour qu'ils se combinent avant de se dégager. Toutefois, l'aspect des surfaces métalliques qui ont transmis un peu longtemps ces courants montre qu'il n'y a pas eu simplement dépôt d'oxygène, mais oxydation suivie immédiatement d'une réduction par l'hydrogène. Le platine lui-même finit par se recouvrir d'une poudre noire qui est du platine très-divisé, dont la production ne peut s'expliquer que par une série d'oxydations et de réductions qu'a dû éprouver ce métal. Nous verrons qu'effectivement

l'oxygène peut, à l'état naissant, devenir capable de se combiner directement au platine[1].

On n'obtient pas toujours la disparition du dépôt avec les courants alternatifs, et on peut quelquefois l'obtenir avec des courants continus. Ainsi, comme exemple du premier cas, je citerai le plomb, qui, employé comme diaphragme, se recouvre avec les courants alternatifs, sur ses deux faces, d'une couche d'oxyde blanc qui n'est pas réduite, tandis que cette couche ne se forme que sur une seule face quand le courant est continu, d'où résulte que, contrairement à ce qui se passe avec les autres diaphragmes, le courant est moins affaibli par la lame de plomb interposée, quand il est continu que quand il est discontinu et alternatif. Comme exemple du second cas, je citerai l'acide nitrique, qui en contact avec l'électrode négatif de platine y rend la résistance au passage tout à fait nulle, en empêchant sur la surface de platine le dépôt de l'hydrogène qu'il absorbe à mesure qu'il s'en produit en se convertissant en acide nitreux. Je citerai encore le fait que j'ai déjà signalé dans le premier chapitre de cette quatrième partie, qu'il suffit d'échauffer ou d'ébranler l'électrode négatif en platine, plongé dans une dissolution acide, pour atténuer notablement la résistance au passage même par un courant continu. M. Beetz s'est assuré par des expériences directes que ce réchauffement et cet ébranlement diminuent proportionnellement plus la polarisation de l'électrode négatif que celle du positif, surtout quand le courant a peu d'intensité, cas dans lequel se manifeste facilement l'influence prépondérante de l'ébranlement et de l'échauffement de l'électrode négatif sur la facilité du courant à être transmis.

Le rôle que joue le platine comme électrode est très-remarquable, car, quoiqu'il passe pour non oxydable, nous le voyons

[1] On observe également la formation de la poudre noire de platine, quand on a transmis longtemps de suite un fort courant à travers un voltamètre à lames ou à fils de platine, chargé avec de l'acide sulfurique étendu de neuf fois son volume d'eau. Cette poudre se dépose au fond du vase, et provient évidemment d'une série d'oxydations et de réductions qu'éprouve la surface de l'électrode négatif sous l'influence alternative de l'oxygène dissous dans le liquide et de l'hydrogène qui se dégage.

se conduire comme les métaux qui le sont, mais à un faible degré. Ainsi la poudre noire qui se forme sur les fils de platine qui ont servi longtemps d'électrodes aux courants alternatifs, dans une solution d'acide nitrique ou sulfurique, indique que ces fils ont éprouvé une série d'oxydations et de réductions, ce que prouve du reste l'état de leur surface quand on a enlevé cette poudre, qui de polie qu'elle était est devenue couverte de rugosités. L'or et le palladium présentent le même phénomène que le platine, mais plus promptement; l'or se recouvre d'une pellicule verdâtre, le palladium d'une couche d'un bleu noirâtre. Ces couches sont également formées par le métal pur, mais très-divisé, car le brunissoir leur rend, comme à la poudre noire de platine, l'éclat métallique, et introduites dans le mélange explosif, les trois poudres le font détonner également ; il faut seulement pour celle d'or élever la température à 50°.

Pour les fils de platine comme pour les fils d'or, la quantité de gaz dégagée va en diminuant à mesure que la couche pulvérulente se forme, et en même temps le courant transmis augmente d'intensité, comme le montrent les indications des voltamètres calorifiques. Ainsi, avec des fils de platine dans de l'eau acidulée à un dixième, au bout d'une minute l'hélice du voltamètre[1] marquait 27° et le gaz dégagé était de 7$^{c.c.}$, et au bout de 17 minutes l'hélice marquait 40° et le gaz dégagé était en tout de 45 cc. environ, et seulement de 1 cc. dans la dix-septième minute. Les fils étaient alors entièrement recouverts de la poudre noire et le mélange gazeux détonnait sans laisser aucun résidu, preuve que l'oxygène et l'hydrogène s'y trouvaient dans les proportions qui forment l'eau. Avec les fils d'or, il y a quelquefois après la détonation un léger résidu d'hydrogène, ce qui tient à ce que l'or s'est légèrement oxydé; ce fait explique pourquoi les courants passent un peu plus facilement, ainsi que le prouve l'indication de l'hélice du voltamètre, qui au bout de dix minutes marque déjà 46°.

L'état de la surface du platine influe sur sa facilité à être désagrégée. Des fils de 18 centimètres de longueur et même

[1] Tome I, figure 21, page 31.

de 33, soit droits, soit tournés en hélice, se recouvrent très-promptement de la poudre noire quand, plongés dans l'eau à un dixième d'acide sulfurique, ils servent d'électrodes à des courants d'induction se succédant à raison de 40 par minute ; l'opération est beaucoup plus longue et plus difficile pour les lames ; et les gaz se recombinent à leur surface longtemps avant qu'on y voie des traces de platine divisé. Avec de l'éponge de platine servant d'électrodes il n'y a jamais dégagement gazeux, et la température du voltamètre calorifique mis dans le circuit est la plus élevée ; en général, cette température atteint son maximum dans tous les cas, dès qu'il n'y a plus développement de gaz[1]. L'échauffement du liquide qui augmente l'intensité du courant, quand, les fils n'étant pas encore noircis, il y a production de gaz, n'exerce presque point d'influence quand, la couche noire étant formée, tout dégagement gazeux disparaît.

La propriété que nous venons de reconnaître dans le platine de déterminer la combinaison des gaz provenant de l'électrolyse à mesure qu'ils se dégagent alternativement à sa surface, doit être évidemment la même que celle en vertu de laquelle ce métal fait détonner, en y étant introduit, un mélange d'oxygène et d'hydrogène fait dans les proportions qui constituent l'eau, ainsi que l'a découvert Doebereiner. Remarquons d'abord que les conditions qui rendent le platine susceptible d'enflammer le mélange détonnant sont aussi les mêmes que celles qui favorisent sa désagrégation dans l'électrolyse, savoir l'absence sur la surface de toute matière étrangère quelconque, les rugosités qu'elle présente, etc. Faraday a même remarqué que le seul fait d'avoir servi d'électrode dans une solution acide rend une lame de platine éminemment propre à déterminer la combinaison de l'oxygène et de l'hydrogène. Ce n'est pas tout, la preuve que dans l'expérience de Doebereiner il y a une succession d'oxydations et de réductions alternatives, c'est qu'un fil de platine bien décapé et tourné en hélice, employé au lieu d'éponge de platine pour enflammer l'hydrogène dans l'air, prend

[1] Il ne faut pas confondre la température du voltamètre calorifique placé dans le circuit, avec celle du liquide décomposé, qui en est tout à fait indépendante.

bientôt une surface pulvérulente grisâtre, qui est due à la désagrégation du métal. Pour faciliter l'opération, il faut chauffer légèrement le fil de platine en le faisant traverser par un courant électrique d'une faible intensité, et diriger sur l'hélice un courant d'hydrogène mêlé avec de l'air atmosphérique au moyen d'un robinet à double issue. On observe la même désagrégation dans un fil de platine qui a servi à la lampe aphlogistique de Davy. Il suffit alors de rouler en hélice un fil de platine de $\frac{1}{4}$ millimètre de diamètre et de le placer sur une lampe à alcool après l'avoir lavé avec soin d'abord dans de l'acide nitrique, ensuite à plusieurs reprises dans l'eau distillée et l'avoir séché à l'abri de la poussière. On allume la lampe de manière que le fil rougisse, et lorsqu'il est rouge, on éteint la flamme, il reste alors incandescent par l'effet de la vapeur d'alcool. Si l'on fait durer l'expérience 24 et même 48 heures, le fil qui était parfaitement uni présente, au bout de ce temps, une surface pulvérulente due au platine désagrégé, preuve que le phénomène de la lampe aphlogistique consiste aussi dans une série d'oxydations et de réductions dues à l'action alternative de l'oxygène de l'air et de la vapeur d'alcool. J'ai beaucoup varié cette expérience : j'ai employé de l'alcool très-pur, des mèches d'amiante au lieu de mèches de coton, j'ai toujours observé le même résultat. J'ai remarqué, en outre, que les fils dont la surface est ainsi désagrégée sont beaucoup supérieurs aux autres pour faire réussir l'expérience de la lampe aphlogistique.

Les phénomènes que présente le platine sont, aussi bien dans ce cas que dans celui de l'électrolyse, tout à fait semblables à ceux qui ont lieu avec les autres métaux plus ou moins oxydables, tels que l'or, l'argent et le cuivre, quand ils sont exposés à l'action de la flamme d'une lampe à alcool, phénomènes que le docteur Henry a si bien étudiés. Ces métaux, et surtout le cuivre, se réduisent bien vite en poussière par la succession d'oxydations et de réductions alternatives qu'ils éprouvent [1].

[1] Les diverses décompositions et combinaisons que détermine le platine, surtout à l'état d'éponge, et qu'on a attribuées à la force catalytique, celles en particulier qu'a observées M. Kulhmann, me paraissent pouvoir s'expliquer très-facilement en

Revenons maintenant aux phénomènes d'électrolyse proprement dits, et voyons comment la propriété que nous venons de reconnaître et d'étudier dans le platine, pourra nous rendre compte d'anomalies qui ont fait croire à plusieurs physiciens que les lois qui régissent les décompositions chimiques étaient en défaut, et par conséquent n'étaient pas générales.

Fig. 241.

J'avais fait une série d'expériences dans lesquelles je m'étais servi pour électrodes de lames et de fils de platine parfaitement purifiés, mais de dimensions différentes, et comme liquide électrolytique d'acide sulfurique très-pur étendu de neuf fois son volume d'eau acidulée. Les lames de platine étaient décapées suivant le procédé indiqué par Faraday, qui consiste à les faire rougir et à les frotter avec un morceau de potasse, pendant qu'elles sont incandescentes, puis à les plonger dans de l'acide sulfurique bouillant et à les laver ensuite dans de l'eau distillée constamment renouvelée. Les fils de platine étaient décapés de même et insérés dans des tubes de verre fermés à la lampe (fig. 241), de manière à ne présenter qu'une très-petite surface de contact avec le liquide. La lame était tournée en spirale et placée sous un tube gradué rempli d'eau acidulée et destiné à recueillir tout le gaz dégagé; le fil était introduit dans un tube semblable, plongé dans le même liquide; les communications de la lame et du fil avec les pôles respectifs de la pile étaient établies au moyen de fils de platine recouverts de tubes de verre, de manière à ne pas avoir de points de contact avec le liquide (fig. 242).

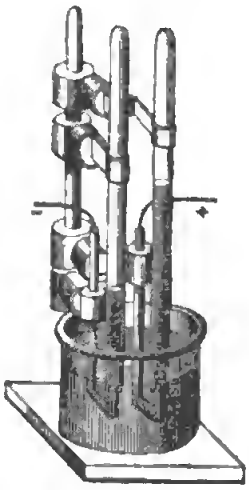


Fig. 242.

Voici le résultat de quelques-unes de ces expériences :

admettant une oxydation du platine immédiatement suivie de sa réduction. On ne peut en effet obtenir ces divers phénomènes qu'autant que l'oxygène est présent sous une forme ou sous une autre.

Digitized by Google

Lame négative.	100cc	d'hydrogène.
Fil positif.	50	d'oxygène.
Fil négatif.	41cc	d'hydrogène.
Lame.	16	d'oxygène.

Il manque 4 cc. $\frac{1}{2}$ d'oxygène qui ont été pris par la lame; dans l'expérience suivante, la lame a été mise immédiatement en communication avec le pôle positif avant de l'avoir été avec le négatif.

Fil négatif.	20cc	d'hydrogène.
Lame positive.	8	d'oxygène.

Manquent 2 cc. d'oxygène pris par la lame. On a changé les pôles :

Lame négative.	15cc $\frac{1}{2}$	d'hydrogène.
Fil positif.	10	d'oxygène.

Manquent 4 cc. $\frac{1}{2}$ d'hydrogène, c'est-à-dire un peu plus du double, et par conséquent l'équivalent environ de l'oxygène qui avait disparu.

Voici encore une expérience dans laquelle la lame, après avoir été fortement décapée, a été mise en communication d'abord avec le pôle positif :

Fil négatif.	20cc	d'hydrogène.
Lame positive.	6	d'oxygène.

Manquent 4cc. d'oxygène. En changeant les pôles :

Lame négative.	14cc	d'hydrogène.
Fil positif.	10	d'oxygène.

Manquent 6 cc. d'hydrogène ; il aurait dû en manquer 8 pour représenter l'équivalent de l'oxygène qui avait été pris par la lame dans l'expérience précédente. En général, il est rare qu'on retrouve tout l'oxygène qu'a pris la lame, soit parce que le liquide en dissout, soit parce qu'il se forme aussi de l'eau oxygénée, comme nous allons le voir. L'oxygène qu'on retrouve et qui est l'équivalent de l'hydrogène manquant, est celui qui est resté à la surface du platine.

De l'éponge de platine et un long fil de platine recouverts de

la poudre noire se conduisent comme la lame décapée, c'est-à-dire qu'ils absorbent une forte proportion d'oxygène. Dans deux expériences successives, le long fil de platine ne donna que 5 mesures d'oxygène contre 20 d'hydrogène dégagé au fil court; il manquait donc 5 cc. d'oxygène; on en retrouva 4 en changeant les pôles, car on n'eut plus alors que 12 hydrogène contre 10 oxygène, preuve que 8 hydrogène avaient été absorbés. Quelquefois il semblerait qu'une petite portion de l'oxyde de platine se dissout, quand la surface du platine sur laquelle il se forme est pulvérulente ou quand l'acide est concentré ou bouillant.

Nous avons dit qu'une portion du gaz se dissout dans le liquide électrolytique, mais cette dissolution est loin d'être la cause des altérations dans les proportions des gaz dégagés; en effet, quand deux électrodes en platine ne changent pas de rôle et continuent à être toujours l'un l'électrode positif, l'autre le négatif, on trouve, après qu'on a fait le départ de l'oxygène, qui est absorbé par le premier en commençant, que les gaz finissent par se dégager dans les proportions qui constituent l'eau, lors même qu'on renouvelle autour de la surface des deux platines le liquide électrolytique. D'ailleurs les polarités secondaires qu'acquièrent les lames de platine, et qu'elles conservent entières en étant transportées dans un autre liquide, sont une preuve que les gaz sont restés adhérents à leur surface, du moins l'oxygène, car il se pourrait que la propriété qu'acquiert la lame négative tînt moins au gaz resté adhérent à sa surface qu'à l'état de pureté auquel l'a amené le dégagement d'hydrogène qui s'y est opéré. C'est ce que nous verrons quand nous nous occuperons dans l'étude des sources de l'électricité, des courants produits par les polarités secondaires. Quant à l'adhérence de l'oxygène, nous avons vu qu'elle ne peut être simplement physique, comme quelques physiciens l'ont admis, mais que c'est bien un phénomène d'oxydation superficielle comme la chimie nous en présente un si grand nombre, puisqu'on ne pourrait expliquer la désagrégation du métal, s'il ne s'y opère pas une série d'oxydations et de réductions. D'ailleurs nous verrons plus loin que dans ces cas l'oxygène est dans un état

particulier qui le rend plus susceptible d'attaquer le platine[1].

Les détails dans lesquels nous venons d'entrer nous permettent maintenant d'expliquer les nombreuses anomalies qu'a présentées à plusieurs physiciens l'emploi des voltamètres à lames et à fils de platine. Faraday avait déjà signalé les erreurs qu'on pouvait commettre en se servant de cet instrument et les précautions à prendre pour les éviter. Plus tard, M. Gassiott fit différents essais avec trois voltamètres dont les électrodes étaient des fils et des lames de platine de dimensions différentes et qu'il remplissait soit d'eau distillée, soit d'une dissolution d'acide sulfurique. En les mettant à la suite les uns des autres dans le circuit, il remarqua que celui à fils courts donnait toujours une proportion de gaz un peu plus forte que les deux autres. M. Poggendorff, pour recueillir les gaz séparément et pour ne pas trop diminuer en même temps la force du courant en enfonçant les tubes de verre qui les recueillent dans le liquide électrolytique, avait imaginé un voltamètre dans lequel les

[1] M. Schœnbein en effet a soutenu qu'il n'y avait oxydation ni du platine ni de l'or, mais qu'il y avait simplement adhérence de l'oxygène à la surface du métal. Il appuyait son opinion sur ce que l'apparence du métal ne change pas, sur ce qu'il ne perd qu'une fraction de son poids hors de proportion avec celle qu'il devrait perdre quand on enlève la couche supposée d'oxyde. Enfin il explique la désagrégation des électrodes par un transport mécanique de particules analogues à celui qui a lieu dans l'expérience des pointes de charbon. A ces objections on peut répondre d'abord qu'il n'y a pas de transport de particules, puisqu'en prenant pour électrodes un fil d'or et un fil de platine, on ne trouve jamais l'or divisé que sur le fil d'or, et le platine divisé que sur le fil de platine. D'ailleurs les conditions favorables à la production de la couche pulvérulente sont précisément inverses de celles qu'exigerait la désagrégation physique, c'est-à-dire l'absence de décomposition du liquide et une forte tension électrique. Quant à l'apparence du métal oxydé, il est vrai, surtout quand il s'agit du platine, qu'elle diffère peu de celle du métal pur, mais il en est de même de bien d'autres métaux, quand il ne s'agit que d'une couche superficielle de sous-oxyde qui, pour les métaux blancs surtout, ne fait que ternir leur surface. Enfin il est bien reconnu de tous les chimistes que leurs creusets de platine finissent par être altérés par l'action des acides sulfurique et nitrique bouillants. On peut même voir, en laissant un morceau d'éponge de platine quelques jours dans un flacon rempli d'acide nitrique parfaitement pur et hermétiquement bouché, cet acide prendre une couleur qui annonce la présence de l'acide nitreux, et par conséquent l'oxydation du platine aux dépens de l'oxygène de l'acide nitrique.

deux tubes gradués qui recueillent l'un l'oxygène et l'autre, à section double, l'hydrogène, sont prolongés au bas par un cylindre d'argile poreux; les deux cylindres sont fixés verticalement au fond d'un vase en verre rempli de l'eau acidulée, et les électrodes en platine sont scellés au fond du vase de manière à pénétrer, l'un dans un des cylindres poreux, l'autre dans l'autre; et ils ressortent extérieurement pour être mis en communication avec les pôles de la pile. De cette manière, non-seulement on empêche les gaz de se mélanger, mais on évite aussi le mélange des liquides qui, en contact avec chacun des électrodes, tiennent plus ou moins en dissolution une portion de l'hydrogène et surtout de l'oxygène, et il n'y a pas ainsi de recomposition entre ces deux gaz.

Cette dernière précaution est d'autant plus nécessaire que M. Jacobi a remarqué, en effet, que la recomposition des gaz mélangés a lieu lors même que les électrodes de platine ne dépassent pas le liquide, dès qu'il y a au-dessus d'eux un tube rempli du mélange gazeux qui se dissout probablement à mesure que celui qui est déjà dissous disparaît sous l'influence du platine pour reformer de l'eau. Si les acides employés sont très-purs et les électrodes parfaitement nets, au bout de quelques heures la combinaison est entièrement opérée et il ne reste point de gaz; la recomposition a lieu encore plus rapidement quand la surface du platine est pulvérulente.

La température paraît diminuer cette facilité des gaz dégagés dans les voltamètres à se combiner; c'est ce qui explique pourquoi M. Soret, en prenant deux voltamètres parfaitement semblables mis à la suite l'un de l'autre pendant le même temps dans le même circuit, mais l'un demeuré froid et l'autre chauffé dans une étuve à vapeur bouillante, a constamment trouvé que le chauffé dégageait une proportion de gaz un peu plus forte. Dès qu'on la laisse refroidir la différence disparaît; celle-ci a constamment été de 2,5 pour 100. Dans ces expériences le voltamètre froid était maintenu dans un mélange de glace et de sel marin. M. Soret déterminait la proportion du mélange gazeux, soit en le mesurant directement, soit en dosant l'hydrogène comme dans une analyse orga-

nique, et par les deux procédés il est arrivé au même résultat.

La différence que nous venons de signaler peut tenir à deux causes : d'abord à ce que l'oxygène, dégagé à une basse température, se combine plus facilement avec l'hydrogène, ce qui fait que la recomposition des gaz est plus forte; ensuite à une formation de bioxyde d'hydrogène qui n'a pas lieu à une tempéture élevée. M. Meidinger a en effet observé, en employant pour électrodes des lames de platine de 40 millimètres de longueur sur 33 de largeur et une dissolution d'acide sulfurique de 1,3 de densité, que la proportion d'oxygène dégagée est inférieure à celle d'hydrogène à la température ordinaire, et lui est légèrement supérieure à une température élevée. Cette influence de la température est d'autant plus marquée que le courant électrique est plus intense. L'hydrogène reste en général assez constant, aussi bien quand on étend plus ou moins la dissolution acide que lorsque l'on fait varier sa température; c'est la quantité d'oxygène qui est généralement d'autant moindre que la dissolution est plus concentrée et plus froide. M. Meidinger avait conclu de ces diverses observations qu'il se forme dans l'électrolyse de l'eau acidulée, du bioxyde d'hydrogène à l'électrode positif. Cette conclusion se trouve confirmée par le fait que la dissolution acide acquiert la propriété de décomposer l'iodure de potassium, propriété que possède l'eau oxygénée, ainsi que par la faculté que possède l'électrode positif de dégager de l'oxygène pur quand, après avoir fait durer longtemps la décomposition de l'acide étendu, on laisse cet électrode dans le liquide, mais qu'il perd dès qu'on le transporte dans un autre liquide. Or, comme on sait que le platine qui a servi d'électrode positif pour décomposer l'eau acidulée, décompose l'eau oxygénée par son contact avec elle, cette expérience est une preuve de la présence de ce composé dans le liquide. On peut, du reste, encore la constater en chauffant l'eau acidulée; on voit alors se produire un dégagement abondant d'oxygène provenant de la décomposition de l'eau oxygénée, et cette eau perd par là la propriété de réagir sur l'iodure de potassium. M. Meidinger a remarqué encore que l'eau oxygénée, en se répandant dans le liquide électrolytique, peut réagir sur l'hydrogène

dégagé à l'électrode négatif, surtout lorsque cet électrode a une grande surface. Ainsi deux voltamètres identiques ayant été remplis l'un d'eau acidulée parfaitement pure, l'autre d'eau électrolysée, c'est-à-dire chargée d'eau oxygénée, on n'a trouvé que 234 centimètres cubes d'hydrogène dans le second voltamètre, tandis qu'il y en avait 240 dans le premier. Il suffit d'introduire la lame de platine qui a servi d'électrode positif dans le liquide du tube où l'hydrogène s'est dégagé, pour voir peu à peu le volume du gaz diminuer par suite de l'action qu'exerce sur lui, sous l'influence du platine, l'eau oxygénée formée pendant l'électrolyse. Ajoutons qu'une basse température et une petite dimension de l'électrode positif favorisent la formation de l'eau oxygénée.

Il résulte de l'analyse que nous venons de faire, et en particulier du travail de M. Meidinger, que pour obtenir des résultats exacts avec le voltamètre, il faut mesurer l'hydrogène provenant de l'électrolyse et non l'oxygène ou le mélange gazeux; qu'il faut se servir, surtout pour dégager l'hydrogène, d'électrodes à petites surfaces; qu'il faut avoir soin de changer l'eau acidulée du voltamètre après chaque expérience, ou du moins de la chauffer pour la débarrasser de toute l'eau oxygénée qu'elle peut renfermer.

Sans nous arrêter à d'autres expériences du même genre, nous nous bornerons à rapporter encore celles par lesquelles M. Despretz en opérant sur une grande échelle avec des voltamètres à fils de platine et de l'eau, soit distillée, soit acidulée à divers degrés avec l'acide sulfurique, a trouvé que la quantité de gaz dégagée dans chacun était, à moins d'un centième près, toujours la même quand ils étaient placés dans le même circuit pendant le même temps. Les voltamètres dont M. Despretz faisait usage avaient pour électrodes des fils de platine placés à 12 millimètres de distance l'un de l'autre; il avait commencé par en remplir trois d'eau acidulée à $\frac{1}{10}$, à $\frac{1}{20}$ et à $\frac{1}{100}$ d'acide sulfurique. Dans 8 minutes il obtint dans chacun avec 12 couples de Bunzen $18^{cc.}$ de gaz. En remplaçant l'eau qui renfermait $\frac{1}{100}$ d'acide sulfurique par de l'eau distillée, il eut avec 300 couples de Bunzen $14^{cc}\cdot 8$ dans chaque voltamètre, sauf dans

celui rempli d'eau distillée, où il eut un volume un peu plus considérable. La moyenne de quatre expériences faites seulement avec deux voltamètres remplis, l'un d'eau pure, l'autre d'eau acidulée, lui donna en 45 minutes $10^{cc}\cdot19$ dans l'eau pure et $10^{cc}\cdot09$ dans l'eau acidulée. Il est vrai que la température de l'eau distillée s'élève considérablement, même jusqu'à 20 fois plus que celle de l'eau qui ne renferme que $\frac{1}{1000}$ d'acide sulfurique. C'est ce qui explique pourquoi le volume gazeux y est légèrement plus considérable, les gaz ne pouvant s'y dissoudre aussi facilement. Du reste, la décomposition de l'eau distillée présente d'autres caractères particuliers; toute l'eau (plus d'un litre dans les expériences de M. Despretz) devient mousseuse et blanchâtre, ce qui tient à la grande dissémination des molécules gazeuses, tandis que l'eau acidulée à $\frac{1}{1000}$ aussi bien qu'à $\frac{1}{10}$ reste complétement transparente, et le dégagement du gaz ne s'y manifeste qu'à l'extrémité des fils, sous forme d'un cercle de bulles. Cette différence remarquable tient à ce que la grande résistance que le courant rencontre dans sa transmission à travers l'eau pure, l'oblige dans ce cas de se disséminer et à passer par tous les points de contact de la surface du fil et du liquide.

Quoi qu'il en soit, on voit donc qu'en tenant compte de toutes ces causes qui peuvent troubler la manifestation de la loi de Faraday et en cherchant à les éviter, cette loi est encore trouvée exacte dans la décomposition de l'eau pure comme dans celle de l'eau acidulée et dans la décomposition des solutions salines[1].

[1] M. Foucault avait cru trouver une preuve de l'existence de la conductibilité physique des liquides dans le fait que de deux voltamètres à lames de platine, mis dans le même circuit, et chargés l'un avec de l'eau distillée, l'autre avec de l'eau aiguisée de $\frac{1}{20}$ d'acide sulfurique, le premier, dans le même temps, ne donnait que 1 centimètre cube de gaz, et le second 10. Mais cette différence, en tout cas beaucoup trop grande, tient à ce que les électrodes étaient formés dans chaque voltamètre d'un faisceau de lames de platine bien dressées, maintenues à une fraction de millimètre les unes des autres, et constituées par un arrangement des conducteurs, alternativement dans des états électriques opposés. Il résultait de cette disposition d'abord que l'oxygène et l'hydrogène, très-rapprochés au moment de leur dégagement, devaient se recombiner l'un avec l'autre, d'autant

Nous avons vu que l'affinité chimique de la substance dont sont faits les électrodes pour l'un ou l'autre des éléments de l'électrolyte peut faciliter sa décomposition, et par conséquent le passage du courant. Cette propriété a été appliquée avec beaucoup de succès par M. Becquerel à la production de composés divers résultant de la combinaison de l'électrode avec l'un des éléments dégagés par le courant, composés qu'il a réussi à obtenir à l'état cristallin en n'employant que de très-petites forces électriques, c'est-à-dire celle d'un seul couple. Il a également obtenu des produits secondaires très-remarquables en se servant d'électrodes composés et en déterminant la combinaison de l'élément dégagé par le courant, avec l'un des éléments de cet électrode composé. En un mot, il a mis à contribution les réactions chimiques que peut faire naître le dégagement par le courant d'un corps à l'état naissant sur la surface de contact d'un solide et d'un liquide.

Ce n'est pas seulement en employant des électrodes suscep-

plus facilement qu'ils se disséminent sur toute la surface des électrodes dans l'eau distillée, à cause de sa conductibilité imparfaite, comme nous venons de le voir à l'occasion des expériences de M. Despretz. Mais, en outre, cette même conductibilité imparfaite de l'eau, jointe au rapprochement si grand des lames de platine, alternativement positives et négatives, déterminait la plus grande proportion des deux électricités à se réunir entre ces lames sous forme d'arc voltaïque, et non électrolytiquement, comme cela a lieu à travers l'air et les corps liquides non conducteurs. Nous avons vu en effet que M. Despretz, en opérant de manière à éviter ces effets perturbateurs, a trouvé que l'eau distillée obéit, comme l'eau acidulée, à la loi des équivalents de Faraday.

A ces preuves indirectes en faveur de l'opinion que les liquides électrolytiques ne possèdent pas une conductibilité physique analogue à celle des solides, mais qu'ils ne peuvent propager les courants qu'en étant décomposés, il vient s'en ajouter une nouvelle plus directe. M. Faraday ayant constaté la possibilité de déterminer par l'action d'un électro-aimant un courant d'induction dans une longue colonne d'eau acidulée renfermée dans un tube de guttapercha tourné en hélice autour de l'électro-aimant, MM. Logeman et Van-Breda ont observé que les lames ou fils de platine qui perçoivent ce courant sont polarisés, ce qui prouve que l'eau acidulée a été décomposée par le courant induit. Or, si la propagation du courant peut s'opérer dans un liquide électrolytique par voie de conductibilité physique, ce doit être dans le cas d'un courant induit dans le liquide par un courant extérieur, et cependant même dans ce cas la propagation est accompagnée d'une décomposition.

tibles d'entrer en combinaison avec les éléments du liquide électrolytique ou d'être décomposés par eux qu'on peut faciliter leur décomposition. Grove, E. Becquerel et Schœnbein sont parvenus à obtenir le même résultat tout en conservant des électrodes de platine, mais en dissolvant dans le liquide des substances qui avaient de l'affinité pour l'un ou l'autre de ses éléments. Ainsi, Grove a obtenu avec le courant d'un seul couple la décomposition de l'eau en disposant l'électrode positif de platine de façon que la portion qui sortait de l'eau fût placée dans un tube rempli d'hydrogène qui lui-même était en contact avec l'eau acidulée électrolysée. La décomposition était facilitée par l'affinité que l'hydrogène, sous l'influence du platine, exerce sur l'oxygène de l'eau. E. Becquerel a réussi de même à décomposer l'eau par un faible courant, en y dissolvant ou des substances avides d'hydrogène, telles que le chlore, le brôme et l'iode, du bichlorure de cuivre ou des sels dont les bases peuvent se suroxyder, tels que du sulfate de peroxyde de fer qui tend sans cesse à prendre de l'oxygène aux corps qui en renferment. En mettant dans le même circuit un voltamètre à eau acidulée ordinaire et ces diverses dissolutions, on obtient dans les dissolutions des proportions d'oxygène et d'hydrogène variables avec chacune d'elles et même avec la rapidité de la décomposition, en conséquence de la facilité plus ou moins grande avec laquelle l'oxygène ou l'hydrogène se combinent avec les substances dissoutes. M. E. Becquerel a trouvé, en employant des éponges de platine et d'or pour l'un des électrodes, l'autre étant une lame de platine, que la décomposition était facilitée, mais qu'une grande proportion de gaz était absorbée par celui des électrodes qui était fait avec l'éponge. C'est toujours une conséquence des propriétés du platine divisé. M. Schœnbein avait déjà employé l'éponge de platine comme électrode positif pour combiner l'oxygène provenant de la décomposition de l'eau contenue dans l'alcool avec cette dernière substance, et former ainsi un produit plus oxygéné. Il avait également réussi à obtenir une décomposition plus facile en se servant pour électrodes négatifs d'éponges de platine qui avaient été plongées dans du chlore ou du brôme gazeux, et qui exerçaient ainsi une forte

affinité sur l'hydrogène. Le même effet est produit et même à un plus haut degré en prenant pour électrode négatif une lame de platine recouverte d'une couche de peroxyde de plomb dont l'oxygène se combine avec l'hydrogène dégagé. Tous ces faits, et j'en omets beaucoup du même genre, nous montrent le rapport intime qui lie l'affinité chimique ordinaire avec la force chimique du courant qui n'est, comme le remarque judicieusement Faraday, que la même force transportée à distance au lieu de ne s'exercer qu'au contact. Et en effet, nous voyons par tout ce qui précède combien son action est facilitée quand elle trouve le concours de celle de l'affinité. Nous compléterons la démonstration de la liaison intime qui existe entre ces deux forces, quand nous nous occuperons de l'action chimique considérée comme source de l'électricité.

Il est toutefois quelques cas qui semblent faire exception à la règle générale que nous venons de poser. C'est celui de certains métaux qui, employés à un faible degré d'oxydation comme électrodes positifs, ne laissent pas passer le courant; tel est le fer quand, comme l'a observé Schœnbein, il est à l'état dit *passif*, état dans lequel il n'est plus attaqué par les acides et se trouve modifié d'une manière très-extraordinaire dans ses propriétés chimiques par l'effet de la présence sur sa surface d'une couche d'un sous-oxyde particulier. Tel est encore le cuivre qui, comme l'a observé M. Grove, s'oxyde et se dissout graduellement quand il sert d'électrode positif, dans l'acide sulfurique étendu, à un courant de force moyenne, mais qui cesse de se dissoudre et arrête la transmission du courant, lorsque celui-ci devient très-fort, ce qui tient aussi à la formation d'un oxyde particulier qui ne peut se combiner avec l'acide. Toutes ces anomalies sont plutôt des phénomènes purement chimiques que des phénomènes électro-chimiques, car ils tiennent à l'impossibilité de certains oxydes de se combiner avec les acides pour former des sels, soit parce qu'ils renferment trop d'oxygène, soit parce qu'ils en renferment trop peu.

§ 5. Mouvements produits dans les liquides électrolytiques par le passage du courant.

Les mouvements qui sont l'effet du passage du courant à travers les liquides électrolytiques sont de deux espèces. Ceux de la première espèce sont le résultat évident de la décomposition du liquide et de la réaction chimique des éléments séparés; ceux de la seconde se manifestent par un transport à travers un diaphragme poreux d'une partie du liquide, et ils semblent être plutôt un effet mécanique qu'un effet électrolytique. Toutefois, même dans ce cas, il ne suffit pas que le liquide soit conducteur, comme le serait du mercure, il faut qu'il soit également un électrolyte. Nous verrons jusqu'à quel point cette circonstance peut éclaircir la nature du phénomène.

Davy avait le premier observé que des globules de mercure, placés entre les deux pôles d'une pile au fond d'un vase rempli d'une solution que le courant décompose, s'allongent du côté du pôle négatif en manifestant un tremblement particulier. Herschell a fait une étude détaillée de ce genre d'action, dont Serullas s'était déjà occupé auparavant, en le rattachant aux mouvements qui résultent de certains phénomènes chimiques. Enfin Nobili a plus tard par de nouvelles recherches, complété les travaux d'Herschell et trouvé la véritable signification de cet ordre de faits.

Herschell avait placé au fond d'un vase du mercure très-pur, recouvert d'une couche d'acide sulfurique concentré d'un centimètre environ d'épaisseur, et il transmettait à travers cet acide un courant d'une pile faiblement chargée. Aussitôt que le courant circule, on voit l'acide éprouver un mouvement rapide de rotation dû à un courant mécanique qui s'établit entre les deux électrodes et qui traverse directement le mercure; les parties de l'acide contiguës au mercure sont celles qui se meuvent avec le plus de rapidité. C'est dans le mercure que réside la cause du mouvement, et on en a la preuve dans le fait qu'il suffit d'humecter avec de l'acide sulfurique la surface du mercure et le vase qui le renferme, pour obtenir un

mouvement très-rapide de rotation de ce métal, en se servant de cette même couche d'acide pour établir le courant. Ajoutons que lorsque le globule de mercure est d'une grosseur considérable, il éprouve une tendance continuelle à s'allonger ou à rayonner vers le pôle négatif, et lorsqu'il en est assez près, il l'atteint et s'amalgame avec lui; s'il est petit, toute sa masse se met en mouvement avec une assez grande rapidité, comme si elle était attirée par le fil négatif; cette attraction apparente est souvent très-énergique, le globule se mouvant avec une grande vivacité vers le fil négatif auquel il adhère dès qu'il vient en contact avec lui. On peut obtenir les mêmes effets en remplaçant l'acide sulfurique par d'autres liquides électrolytiques, tels que des acides plus ou moins concentrés, des solutions salines de diverses espèces; mais l'intensité des mouvements varie avec la nature du liquide. Il faut toujours que le mercure soit très-pur, et on observe généralement des courants plus ou moins violents qui rayonnent du point le plus près du pôle négatif. Avec certains liquides, et en particulier les nitrates, il se forme aussi un courant rayonnant du pôle positif qui, même dans quelques cas, l'emporte sur l'autre; ces deux courants coexistent dans le mercure, et, en conséquence de leur action, il se forme dans le globule de mercure une zone d'équilibre plus près de l'un ou de l'autre pôle, suivant que le courant est plus ou moins violent. En opérant au moyen d'une pile énergique et avec une grande quantité de mercure placé au-dessous de dissolutions très-étendues, on aperçoit presque dans tous les cas ces contre-courants qui viennent du pôle positif, surtout si l'on a soin de tenir ce pôle rapproché et le négatif éloigné du globule de mercure.

On peut varier les expériences en mettant l'un des pôles immédiatement en contact avec le mercure, tandis que l'autre plonge seul dans le liquide électrolytique. On obtient des courants très-sensibles qui rayonnent du pôle placé dans ce dernier liquide; quand c'est le pôle positif qui est en contact avec le mercure, ces courants sont moins visibles à cause de la promptitude avec laquelle la surface du métal s'oxyde; mais aux agitations du mercure on s'aperçoit de l'existence des cou-

rants au-dessous de la couche d'oxyde; du reste, en empêchant l'oxydation par quelques gouttes d'acide nitrique affaibli, on voit les courants s'établir aussi bien dans ce cas que dans l'autre.

L'influence de la formation d'une couche oxydée sur les mouvements semble déjà montrer que ces effets ne sont pas le simple résultat d'une action mécanique, mais qu'il se passe aussi là un phénomène électro-chimique. Cette conséquence validée par d'autres expériences d'Herschell lui-même, sur lesquelles nous reviendrons, a été complétement confirmée par l'analyse que Nobili a faite de ces phénomènes en les rattachant à la formation des apparences électro-chimiques. Le savant Italien se borne à remplacer, dans l'appareil que nous avons décrit[1], la lame métallique par une surface AB (fig. 243) de mercure bien pur de 6 à 8 centimètres de diamètre, qu'il

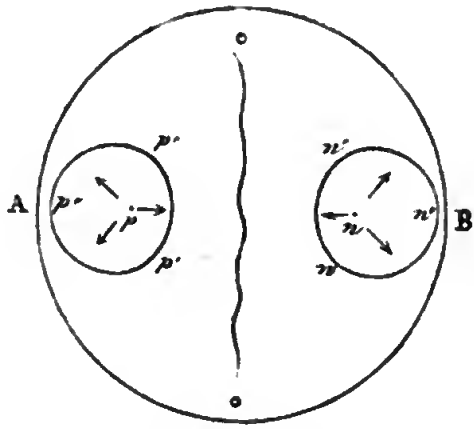


Fig. 243.

recouvre d'une dissolution de sulfate de soude formant une couche de 5 à 6 millimètres d'épaisseur, dans laquelle plongent deux pointes de platine en communication avec les pôles d'une pile de force médiocre, de manière à ne laisser entre elles et la surface du mercure qu'un intervalle aussi petit que possible. On voit aussitôt se former deux systèmes de courants terminés par des limites qui correspondent aux contours des apparences électro-chimiques ordinaires. Ces limites consistent

[1] Tome II, page 338.

en deux lignes n', n' n'' et p', p', p'' ou bandes ovales, au dedans desquelles le mercure est un peu plus déprimé qu'au dehors; la première se forme au-dessus de la pointe négative et la seconde au-dessus de la positive. Au milieu, en o o, le mercure présente une ou deux lignes où sa surface paraît agitée comme par la rencontre des deux courants opposés, circonstance qui, jointe à celles que nous avons déjà rapportées, prouve bien que le siége du mouvement est à la surface du mercure et que la dissolution électrolytique ne fait que suivre le mouvement imprimé aux particules de ce métal. Il se forme presque toujours en p un peu d'oxyde qui est porté par les courants en dehors vers le contour où il s'accumule plus ou moins; puis il se répand vers le côté négatif qui l'absorbe et le réduit quand les courants de ce côté sont affaiblis au point de ne plus en empêcher l'expansion. Les courants négatifs disparaissent en même temps que l'ovale n', n' n'', dès que la couche d'oxyde est poussée par les courants positifs au delà de leurs limites ordinaires. Il suffit de mettre obstacle à l'expansion de cette couche au moyen d'une petite lame de verre plongée en o o à la surface du mercure pour voir les courants se maintenir en n et la couche d'oxyde s'accroître en p, de manière à prendre assez de consistance pour détruire les courants positifs; mais si l'on enlève la lame avant que l'oxydation soit bien avancée, on voit la pellicule d'oxyde se rompre en plusieurs fragments dont les intérieurs se répandent vers le côté négatif où ils sont absorbés et réduits, ce qui affaiblit les courants négatifs et ranime en même temps les positifs.

Quand on remplace la dissolution de sulfate de soude par d'autres, on obtient suivant la nature de ces dissolutions, ou les deux systèmes de courants rayonnants, ou seulement un seul, tantôt l'un, tantôt l'autre. La cause de ces différences tient à ce que les éléments qui viennent se déposer sur les pôles secondaires formés par le mercure couvrent sa surface d'une couche mince ou la laissent nette de tout dépôt apparent. Ainsi il n'y a point de courants négatifs avec des solutions de sels à base de cuivre, d'argent, d'étain, de bismuth, parce que les bases sont réduites sur le mercure en présentant à l'œil des couches plus

ou moins consistantes, tandis que ces mêmes courants sont très-vifs avec des solutions de sels alcalins ou terreux dont les métaux laissent, en se déposant, le mercure aussi liquide et aussi brillant. Les courants positifs manquent également chaque fois que l'oxygène et les acides se déposent en couches minces à la surface du mercure; d'où résulte qu'on peut dire que les courants ne se forment que là où manquent les couches qui déterminent les apparences électro-chimiques.

Les liquides superposés ne font que suivre le mouvement imprimé aux molécules du mercure; il faut donc, pour apprécier la rapidité de leur déplacement, tenir compte du degré de mobilité qu'ils possèdent sur la surface de ce métal; mais il ne faut pas oublier que la vivacité des mouvements du mercure lui-même tient à la nature de ces liquides, puisqu'elle est un effet de leur décomposition. L'acide sulfurique dont les gouttes, comme on le sait, s'étendent sur le mercure avec une rapidité extraordinaire, est celui de tous qui possède au degré le plus éminent la propriété dont il s'agit. Il suffit de la force électromotrice la plus faible comme celle résultant d'un couple formé par le mercure lui-même, l'acide sulfurique et un fil de fer qu'on y plonge, pour déterminer le phénomène [1].

On peut faire l'expérience sous une forme très-remarquable et qui n'exige qu'une pile très-faible. On prend une masse de mercure à laquelle on cherche à donner une figure bien circulaire de 3 centimètres de diamètre environ; on la recouvre d'une solution alcaline bien limpide. Une pointe de platine communiquant avec le pôle négatif de la pile est placée au-dessus du centre de la goutte de mercure de manière à effleurer sa

[1] Voici comment M. Nobili s'y prend. Il plonge une goutte de mercure dans un bain d'acide sulfurique et la touche vers le bord avec l'extrémité d'un fil de fer; la goutte se contracte immédiatement et ne touche plus le fer; puis, reprenant sa figure naturelle, elle vient de nouveau rencontrer la pointe de fer pour se contracter et s'étendre ensuite, continuant ainsi un mouvement alternatif de contraction et de dilatation, tant que dure l'action voltaïque des trois éléments du couple, savoir : mercure, fer et acide. On n'obtient effectivement ce résultat qu'en employant le fer ou d'autres métaux aisément oxydables; le contact de l'or ou du platine ne produit aucun effet.

surface; une seconde pointe semblable, à laquelle aboutit le pôle positif, plonge dans la solution au-dessus du contour du mercure, à une distance de 10 à 12 millimètres de son bord extérieur. Dès que le circuit est établi, le mercure s'aplatit notablement et se présente sous forme d'une étoile à quatre pointes émoussées dont l'une vient toucher le fil positif; aussitôt que ce contact a eu lieu, le mercure rentre sur lui-même en s'élevant vers la pointe négative qu'il touche de nouveau, puis il s'aplatit, et ainsi de suite. Dans son mouvement de retour, la goutte circulaire se présente encore sous l'aspect d'une étoile dont les pointes obtuses se trouvent là où étaient les échancrures de la première.

Les effets que nous venons de décrire, déjà passablement complexes, le deviennent encore davantage quand le mercure est allié avec un métal très-oxydable. Le sodium en particulier détermine, par son amalgamation avec le mercure, des mouvements encore plus prononcés que les autres métaux du même genre, quoique tous ceux qui sont oxydables possèdent plus ou moins la même propriété. Herschell et Nobili ont successivement étudié avec soin cette influence des métaux qui, du reste, avait déjà été signalée par Ermann, Pfaff et Serullas; ce dernier chimiste l'avait observée directement sans le secours de la pile. Il avait cherché à analyser les mouvements giratoires singuliers que prennent les alliages du potassium avec différents métaux quand ils flottent en petits fragments sur le mercure au-dessus de l'eau; ceux que produit l'alliage de potassium et de bismuth lui avaient paru particulièrement énergiques et durables.

Il est évident que dans les expériences de Herschell et de Nobili que nous allons brièvement rapporter, les effets dus à la présence du sodium ou des métaux semblables provenant de l'électrolyse, ne sont que secondaires, puisqu'on peut les obtenir en alliant directement le mercure avec ces métaux; mais comme ils se combinent avec les effets plus directs du courant, ils doivent être analysés pour qu'on puisse bien se rendre compte de ces derniers.

La manière la plus simple de mettre en évidence cet ordre

de phénomènes consiste à plonger (fig. 244) dans le mercure, quand il est recouvert de sulfate de soude, la pointe négative de manière à avoir en $n\ n'\ n''$ un seul pôle négatif au-dessus de la pointe positive. Cette simple immersion ranime les courants

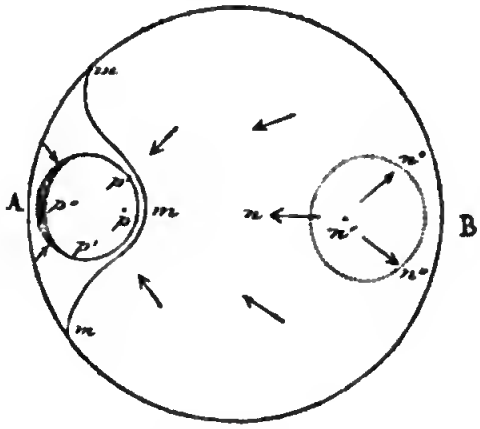


Fig. 244.

négatifs dus essentiellement au dégagement du sodium qui s'unit au mercure ; un contact d'une minute suffit pour charger l'amalgame d'autant de sodium qu'il en faut pour produire les effets suivants. Au moment où l'on retire du mercure la pointe négative, on voit disparaître les courants positifs autour du point p ; on observe, au contraire, un système de courants qui de tous les points de la circonférence du mercure convergent rapidement vers le centre. Ces courants ont des vitesses différentes, ce qui infléchit la tache en A ; celle-ci a devant elle une ligne ou bande plus ou moins vive $m\ m\ m$, qui s'avance vers le point n à mesure que le mouvement diminue et finit par former l'ovale ponctué autour de ce dernier point, quand le sodium étant tout oxydé, le phénomène revient à son état primitif.

Le point essentiel qu'avait remarqué Herschell et qu'a confirmé Nobili, c'est l'inversion du mouvement à l'endroit des courants positifs que produit la présence du sodium dans le mercure. M. Nobili l'attribue à ce que le sodium, qui a une forte tendance à s'unir avec l'oxygène et les acides qui se trouvent à l'état naissant en p, p' et p'', y accourt et détermine ainsi un système de courants très-rapides, directement opposé au

rayonnement qui a lieu lorsque le mercure, privé de ce métal éminemment oxydable, n'a autre chose à faire qu'à propager du centre à la circonférence l'impulsion qu'il reçoit de l'oxygène et des acides dégagés.

Pendant qu'une partie du sodium arrive de tous les côtés pour se convertir en alcali sous l'influence de l'oxygène, le mercure lui-même reçoit en *n n'* et *n''* une autre partie de ce sodium qui produit les courants négatifs ordinaires; mais à cause des mouvements que détermine le sodium déjà présent, le contour ordinaire de l'apparence négative se déforme et s'allonge au point d'être transporté du côté interne jusqu'en *m m m*, ce qui fait qu'en même temps l'autre dépression *p p' p''* s'incline notablement vers A. Celle-ci se relève et se reforme autour de son centre à mesure que le mouvement s'affaiblit par la perte de sodium que subit l'amalgame; quand l'ovale reparaît autour du point *n*, c'est un signe que l'oxygène de la tache positive n'a plus de sodium à oxyder; alors il attaque le mercure et le recouvre d'une couche qui empêche bientôt tout mouvement.

Nous n'insisterons pas sur les effets qu'on obtient en plongeant dans les amalgames recouverts d'une solution électrolytique un fil de cuivre ou de platine, parce que ce sont des effets du même genre que les précédents, vu qu'on produit ainsi un couple voltaïque; nous ne nous arrêterons pas non plus aux nombreuses expériences d'Herschell faites avec divers amalgames et différentes solutions, parce qu'à l'intensité près, ce sont les mêmes phénomènes. Nous nous bornerons à deux remarques. La première consiste à signaler cette propriété curieuse d'un métal très-oxydable amalgamé avec le mercure de se porter, sous l'influence du courant, là où il trouve de l'oxygène et un acide avec lesquels il puisse se combiner. Nous y reviendrons en nous occupant de l'électricité dégagée dans les couples voltaïques dont l'un des éléments est un amalgame. La seconde remarque, c'est que le mouvement du mercure dans le cas ordinaire est évidemment dû à l'absorption qu'il exerce sur les éléments que l'électrolyse dépose à sa surface, non-seulement sur l'oxygène, d'une part, et sur le so-

dium ou autres bases métalliques, d'autre part, mais aussi sur l'hydrogène, comme nous en verrons des preuves plus tard. Et en effet, dès que ces éléments ne sont pas absorbés, mais restent à la surface, le mouvement cesse. Quant aux mouvements eux-mêmes, ils ne sont point un effet mécanique du courant analogue aux phénomènes électro-dynamiques de répulsion et d'attraction, car les aimants les plus forts ne les modifient point, tandis que, comme on le sait, ils déterminent des rotations énergiques sur le mercure, qui transmet simplement les courants sans intervention d'aucun liquide électrolytique. Ces mouvements sont donc le résultat d'actions purement chimiques; ils sont analogues à ceux qui sont produits dans une foule de combinaisons dans lesquelles les corps sont mobiles, soit parce qu'ils sont liquides, soit parce que, tout en étant solides, ils flottent sur un liquide, comme le sodium et le potassium, ou peuvent glisser sur un plan uni comme des globules d'étain ou de fer en ignition. L'effet du courant dans les phénomènes qui viennent de nous occuper est seulement d'imprimer une direction à ces mouvements, parce qu'il en imprime une à l'action chimique en transportant par l'électrolyse, dans des points déterminés, les éléments entre lesquels elle s'exerce.

Les mouvements du mercure peuvent être produits encore d'une manière remarquable au moyen d'une succession de courants instantanés et dirigés alternativement en sens contraire, tels que ceux qu'on obtient par induction avec la machine de Saxton. On fait communiquer l'une des extrémités du fil induit avec du mercure placé dans une capsule cylindrique, et l'autre avec une pointe de platine plongée dans une solution électrolytique, telle que de l'acide sulfurique étendu de neuf fois son volume d'eau, qui recouvre la surface du mercure, de manière à en être à 3 ou 4 millimètres de distance et à correspondre à son centre. Dès que les courants passent, on voit le mercure s'agiter et prendre un mouvement vibratoire avec des ondulations partant du centre et dont la forme circulaire, elliptique ou polygonale, dépend du contour du vase.

On obtient également un effet assez curieux en plaçant du

mercure dans un tube courbé en forme de syphon renversé, et en faisant communiquer l'une des colonnes verticales avec le pôle négatif d'une pile, pendant que le positif est plongé dans une dissolution électrolytique qui recouvre le sommet de l'autre ; il se produit une dépression dans cette dernière colonne, et par conséquent une différence de niveau entre les deux colonnes de mercure qui est plus ou moins grande, suivant l'intensité du courant[1]. Il semblerait qu'il y a dans ce cas un phénomène analogue à celui que présente l'arc voltaïque quand on prend le mercure pour électrode négatif; cependant l'effet pouvant être produit par un courant très-faible, il est probable qu'il est, comme les précédents, purement électro-chimique.

Je ne m'étends pas davantage sur l'ordre de faits que je viens de décrire, et auxquels on avait en général assigné une importance plus grande qu'ils n'en méritent réellement. On peut les considérer au fond comme se rattachant au rôle du mercure dans les phénomènes électro-chimiques, rôle, il est vrai, assez singulier dans les cas d'amalgation, et sur lequel, comme je l'ai dit, nous aurons l'occasion de revenir, mais cependant d'un intérêt assez restreint, vu son caractère spécial.

La seconde espèce de mouvement que nous avons signalée en commençant ce paragraphe, consiste dans un transport qui s'opère à travers un diaphragme poreux d'un liquide traversé

[1] Gerboin, en 1801, avait le premier signalé ces mouvements; il opérait avec un tube courbé en forme d'U, soit de syphon renversé; le tube était rempli de mercure jusqu'à la moitié de la hauteur des branches verticales; la surface du mercure était au sommet de chaque colonne recouverte d'une couche d'eau dans laquelle plongeaient deux fils métalliques qui communiquaient respectivement avec les pôles de la pile. C'est surtout sur la surface de celle des colonnes de mercure qui, étant au-dessous du pôle positif, recevait l'hydrogène provenant de la décomposition de l'eau, qu'il voyait des mouvements qui se manifestaient par la tendance des petits corps légers qu'on y jetait, de se porter de dedans en dehors sur la surface du tube. Mais si l'on faisait toucher au mercure la pointe positive, le mouvement des petits corps légers avait aussitôt lieu en sens contraire, c'est-à-dire de la circonférence au centre; le mercure paraissait également déprimé au-dessous de la pointe positive, quand cette pointe en était très-rapprochée.

Aucun effet n'avait lieu sur la surface du mercure placé au-dessous de la pointe négative; elle était seulement oxydée.

par le courant. Porret, qui l'a observé le premier, faisait l'expérience en séparant une capsule en deux compartiments au moyen d'un diaphragme en baudruche, et en mettant dans chacun de l'eau ordinaire avec le pôle positif d'une pile dans l'un des deux et le négatif dans l'autre. Au bout de peu de temps, on voit l'eau passer à travers la baudruche dont elle surmonte la résistance, de la case positive dans la négative où elle se maintient à un niveau plus élevé. Le phénomène n'est bien prononcé qu'autant que le liquide est un conducteur imparfait, tel que l'eau pure; avec de l'eau acidulée, il n'a plus lieu. M. Becquerel a obtenu un phénomène du même genre avec deux tubes remplis à moitié d'argile et d'eau, dont les ouvertures inférieures, fermées par des bouchons percés de petits trous, étaient plongés dans l'eau, tandis que les liquides intérieurs de chaque tube étaient mis respectivement en communication avec chacun des pôles d'une pile au moyen de lames de platine. L'argile était chassée du tube où plongeait le pôle positif et non de l'autre.

Il résulte de ces expériences qu'il y a une tendance bien prononcée d'un liquide traversé par un courant à cheminer du pôle positif vers le négatif, pourvu qu'il présente une certaine résistance au passage du courant. M. Wiedemann a réussi, à la suite de recherches très-précises, à trouver les lois de ce phénomène. Dans une première série d'observations, il a eu pour but de déterminer la relation de l'intensité du courant voltaïque avec la quantité du liquide transporté en un temps donné.

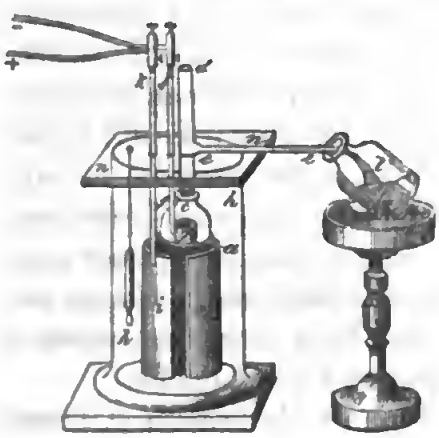


Fig. 245.

Le liquide était renfermé dans un grand vase de verre *hh* (fig. 245), et dans un cylindre d'argile poreuse *a*, occupant le milieu du grand vase. Sur le cylindre d'argile était mastiquée une cloche de verre *c*, dont la tubulure laissait passer un

tube vertical *d*, muni d'un tube latéral d'écoulement *ee*. A l'intérieur et à l'extérieur du cylindre d'argile se trouvaient deux lames de platine *g* et *i*, roulées en cylindre, communiquant toutes deux avec des fils verticaux *f* et *k*, qu'on pouvait mettre en rapport avec les pôles de la pile. La petite ouverture par où le fil *f* traversait la cloche *c*, était hermétiquement fermée avec du mastic; l'adaptation du tube vertical *d* à la tubulure était assez parfaite pour rendre impossible la sortie du liquide. Le cylindre d'argile poreuse avait été immergé pendant longtemps dans l'acide chlorhydrique étendu avant de servir à l'expérience; on l'avait ainsi débarrassé de toutes les matières solubles qu'il pouvait contenir.

Dès que le courant était établi dans le sens indiqué sur la figure, le liquide s'élevait dans le tube *d* et ne tardait pas à s'écouler par le tube latéral *e*, lorsque le niveau avait dépassé d'une petite quantité l'orifice de ce tube; le flacon *l* recevait d'ailleurs le liquide écoulé. Le phénomène résultait principalement d'une action propre du courant, mais il y avait aussi quelques causes secondaires dont il fallait apprécier et éliminer l'influence.

On aurait d'abord pu craindre que la pression résultant de l'élévation du niveau dans le tube *d* ne tendît à contrarier le phénomène et à diminuer la quantité de liquide transportée à travers le cylindre poreux; mais une expérience directe montra que cette crainte n'était pas fondée. On remplit d'eau l'appareil, de manière à établir dans le tube *d* une élévation de niveau égale à l'élévation observée, et l'on abandonna l'expérience à elle-même pendant plusieurs heures sans faire passer de courant. Le niveau étant demeuré invariable, on en conclut que la pression exercée n'était pas assez forte pour faire passer une quantité d'eau appréciable à travers le diaphragme.

Au commencement de l'expérience, l'élévation et l'écoulement du liquide étaient dus en partie aux bulles d'hydrogène dégagées sur la lame négative, qui venaient se loger dans diverses parties de l'appareil; mais, au bout de peu d'instants, l'accumulation de gaz atteignit son maximum, et les nouvelles bulles formées se dégageaient incessamment par le tube *d*.

C'est alors seulement que commençaient les observations. Évidemment rien de pareil n'avait lieu lorsqu'on expérimentait sur des dissolutions métalliques.

Enfin, si l'expérience durait longtemps, l'intensité du courant demeurant constante, la quantité de liquide écoulée en un temps donné éprouvait un petit accroissement. En même temps, le liquide placé à l'intérieur du cylindre poreux se troublait par la présence de particules très-fines de la matière du cylindre. Ces particules étaient évidemment arrachées par le liquide aux pores du diaphragme; ces pores devaient donc s'élargir, et de là résultait l'accroissement observé du courant liquide.

Le courant était produit par une pile de Daniell, et mesuré par une boussole de tangentes ou par un galvanomètre comparé directement avec la boussole.

Les deux tableaux suivants démontrent d'une manière évidente que *les quantités de liquide, transportées dans des temps égaux, sont proportionnelles aux intensités des courants.*

I. EAU DISTILLÉE.

Quantité q de liquide transportée.	Intensité i du courant.	Rapport $\frac{q}{i}$.
gr.		
17,77	14,4	1,23
13,26	10,8	1,23
10,59	8,3	1,27
7,46	6,0	1,24
5,89	4,8	1,23
4,47	3,6	1,24
3,38	2,9	1,17
	Moyenne. . . .	1,23

II. SULFATE DE CUIVRE.

q	i	$\frac{q}{i}$.
gr.		
2,48	10,6	0,234
2,32	10,1	0,230
2,26	9,8	0,231
2,11	9,3	0,226
1,49	6,5	0,229
1,25	5,35	0,233
	Moyenne. . . .	0,230

M. Wiedemann a également trouvé, en recouvrant successivement diverses portions de la surface du cylindre avec un enduit imperméable au liquide et non conducteur de l'électricité, puis en diminuant graduellement son épaisseur, que *les quantités de liquide transportées par un courant galvanique à travers une paroi poreuse sont indépendantes de l'étendue de cette paroi et de son épaisseur*. Il n'a trouvé aucune loi qui lie la quantité transportée avec la résistance du liquide, mais il a remarqué, comme je l'avais observé en 1825, que les liquides très-conducteurs, tels que l'acide sulfurique étendu, ne sont pas transportés en proportion appréciable.

Les expériences qui viennent d'être décrites étaient sujettes à une assez grave objection ; en effet, elles ne mesuraient qu'un phénomène complexe produit par la combinaison de deux causes tout à fait différentes, savoir : l'action propre du courant et le frottement du liquide dans les pores du diaphragme. Cette dernière cause ne laissait évidemment subsister aucune comparabilité entre les expériences relatives à des liquides différents. C'est pourquoi M. Wiedemann a cherché un mode d'expérimentation qui fût indépendant de cette action perturbatrice, et il s'est arrêté à l'idée de mesurer la pression hydrostatique, qui peut faire disparaître le phénomène du transport, et qui, par conséquent, fait équilibre à l'action propre du courant. L'appareil précédemment décrit a été modifié en conséquence. Le tube capillaire *e* a été mis en communication avec un petit manomètre à mercure *apm* (fig. 246), et l'extrémité supérieure du tube vertical *d* (fig. 245) a été hermétiquement fermée après l'introduction du liquide. Dans ces conditions, le passage du courant, au lieu de produire un écoulement constant du liquide, a déterminé un déplacement du mercure dans le manomètre, et ce déplacement s'est arrêté lorsque la pression, due à la différence de niveau du manomètre dans les deux branches, a été assez forte pour faire repasser à chaque instant, à travers

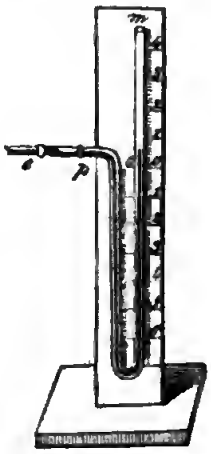


Fig. 246.

les pores du cylindre, une quantité de liquide égale à celle que le courant voltaïque entraînait. Il est évident qu'il fallait éviter, dans cette disposition de l'appareil, tout dégagement de gaz dans le tube *d*, et, par conséquent, qu'on devait se borner à expérimenter sur les dissolutions de sels métalliques. L'eau pure, ou simplement acidulée, les dissolutions de sels alcalins, ne se prêtaient pas à ce genre d'expérience.

Des expériences nombreuses sur les dissolutions diversement concentrées de sulfate de cuivre conduisirent à la loi suivante :

Les hauteurs auxquelles s'élève le mercure dans le manomètre sont proportionnelles à l'intensité du courant, en raison inverse de la surface et en raison directe de l'épaisseur du diaphragme poreux.

Ces résultats s'accordent parfaitement bien avec ceux des expériences sur les quantités de liquides transportées, si l'on tient compte des lois de l'écoulement des liquides par les tubes capillaires, telles qu'elles ont été déterminées par MM. Hagen et Poisseuille. On sait en effet que les quantités de liquide, qui s'écoulent dans des temps égaux par des tubes capillaires très-étroits, sont proportionnelles aux pressions et en raison inverse de la longueur des tubes. Or, un diaphragme poreux peut être assimilé à un système de tubes capillaires dont le nombre est évidemment proportionnel à l'étendue superficielle du diaphragme, et la longueur proportionnelle à l'épaisseur. Les quantités de liquide transportées par le courant voltaïque étant proportionnelles à l'intensité de ce courant, et indépendantes de l'épaisseur du diaphragme, les pressions, capables de produire en sens inverse le transport d'une quantité égale de liquide, doivent être proportionnelles à l'intensité du courant et à l'épaisseur du diaphragme. L'influence de l'étendue superficielle du diaphragme n'est pas moins évidente; la pression qui détermine le passage d'une quantité donnée de liquide à travers un système de tubes capillaires égaux, doit être en raison inverse du nombre de ces tubes.

Enfin, l'influence de la nature du liquide se manifeste d'une manière très-simple dans ce second genre d'expériences. *La hauteur du mercure dans le manomètre est proportionnelle à la résis-*

tance électrique du liquide. C'est du moins ce qu'on peut conclure d'une série d'observations relatives à des dissolutions de sulfate de cuivre, où le courant était amené par des électrodes de cuivre, de façon à éviter toute polarisation. Ces observations sont résumées dans le tableau suivant :

PROPORTION de sulfate cristallisé pour cent parties de la dissolution.	RÉSISTANCE électrique de la dissolution.	RAPPORT de la hauteur du mercure à l'intensité du courant.	QUOTIENT des nombres de la 3e colonne par ceux de la 2e.
16,25	18,0	1,35	0,0750
9,22	27,0	1,98	0,0733
6,6	32,5	2,44	0,0750
3,4	55,5	3,79	0,0683
1,3	100,0	6,80	0,0680
		Moyenne. . . .	0,0719

La constance approchée des nombres de la quatrième colonne est une preuve satisfaisante de l'exactitude de la loi. En résumant toutes ces lois, on peut dire que *la force avec laquelle un courant voltaïque tend à transporter un liquide à travers une paroi poreuse du pôle positif vers le pôle négatif, est mesurée par une pression qui est directement proportionnelle à l'intensité du courant, à la résistance électrique du liquide, et à l'épaisseur de la paroi, et inversement proportionnelle à la surface de la paroi.*

M. Wiedemann remarque que les lois simples auxquelles il a trouvé que sont assujetties les actions mécaniques d'un courant sont les mêmes que celles que Obm a assignées pour la distribution de l'électricité dans un circuit fermé. Mais la question qui se présente ici est de savoir si ces actions mécaniques sont bien l'effet direct du courant, ou si elles ne sont point une conséquence indirecte d'un phénomène électrolytique. Cette dernière opinion, qui avait déjà été mise en avant par M. Raoult à la suite d'expériences plus ou moins contestables, a été reprise par M. Graham, qui estime que, de même que dans la décomposition de l'eau acidulée, un équivalent d'acide sulfurique se

rend avec l'oxygène à l'électrode positif, pendant qu'un équivalent d'hydrogène se dégage à l'électrode négatif, de même dans la décomposition de l'eau pure un radical basique composé de plusieurs atomes d'eau et d'un équivalent d'hydrogène se rend à l'électrode négatif pendant que l'équivalent d'oxygène se dégage au positif. Cette manière d'envisager le phénomène supposerait que l'eau, lorsqu'elle est sous l'influence d'un courant électrique qui la polarise, revêtirait une constitution chimique particulière en vertu de laquelle un nombre d'atomes d'eau considérable, mais variable cependant, seraient associés ensemble pour constituer une molécule d'eau liquide dont un atome d'oxygène formerait le radical négatif ou acide analogue au chlore en demeurant à part, tandis que tous les autres atomes formeraient un radical basique ou positif, contenant en définitive un équivalent d'hydrogène qui n'est pas neutralisé et qui lui donne l'affinité basique, comme cela a lieu dans beaucoup de radicaux organiques. Maintenant, c'est ce radical basique volumineux qui se transporte dans la décomposition électrique de l'eau pure, et se décompose en hydrogène gazeux et en eau à l'électrode négatif, en produisant cette accumulation d'eau qu'on y observe; en même temps l'oxygène se rend seul à l'électrode positif. Le diaphragme poreux est nécessaire pour mettre en évidence cette accumulation de l'eau à l'électrode négatif, afin d'empêcher le liquide de reprendre son niveau, comme il était nécessaire dans les expériences de Daniell pour mettre en évidence l'accumulation de l'acide à l'électrode positif dans la décomposition de l'eau acidulée. L'analogie est encore plus complète quand on met un voltamètre à eau acidulée dans le même circuit où se trouve l'appareil à cloison, plein d'eau ordinaire; je me suis assuré que la quantité de gaz dégagée dans ce dernier appareil est exactement égale à celle qui est dégagée dans le voltamètre. Or, s'il y avait dans le fait du transport de l'eau un travail mécanique indépendant de l'électrolyse, il devrait trouver son équivalent dans une décomposition d'eau plus abondante au voltamètre, ce qui n'a pas lieu; d'où il semblerait résulter que dans les deux appareils il y a simplement deux effets chimiques équivalents, l'un la décomposition de l'eau aci-

dulée avec oxygène et acide à l'électrode positif et hydrogène au négatif, et l'autre la décomposition de l'eau pure avec oxygène à l'électrode positif et eau et hydrogène basique au négatif.

La constitution hypothétique que prendrait l'eau sous l'influence de la polarité électrique n'aurait rien d'étonnant, car de même qu'une molécule d'oxygène ou de tout autre corps simple se compose d'un groupe d'atomes chimiques plus ou moins nombreux, rien n'empêche de supposer qu'une molécule d'eau se compose d'un groupe d'atomes chimiques d'eau (composés chacun de 1 atome chimique d'oxygène et 2 d'hydrogène) plus ou moins nombreux. Dans ce groupe un atome d'oxygène se détache par le passage du courant pendant que les autres atomes d'eau, avec les deux atomes d'hydrogène, forment un groupe semblable avec l'atome d'oxygène du groupe ou de la molécule suivante, suivant la théorie de Grotthus, jusqu'à l'électrode négatif où finalement ils deviennent libres.

M. Graham, appliquant les mêmes idées à l'endosmose ordinaire, voit dans cet ordre de phénomènes un effet de l'électricité produite par l'action chimique qu'exercent les liquides entre lesquels la substance poreuse est interposée, sur cette substance elle-même; il donne le nom de force *osmotique* à cette forme particulière que revêt la force électrique ainsi produite; il explique ainsi pourquoi le phénomène est beaucoup plus fréquent et plus prononcé avec les membranes animales qu'avec des terres poreuses. Il n'en est pas de même quand l'endosmose étant électrique, l'électricité est fournie aux liquides directement par une source extérieure, cas dans lequel la nature du diaphragme poreux n'a d'autre influence que celle qui résulte de la facilité plus ou moins grande avec laquelle il laisse passer le courant électrique. Nous reviendrons sur ce sujet quand nous traiterons de l'électricité développée par les actions chimiques dont l'endosmose serait simplement dans cette théorie une manifestation remarquable; nous examinerons alors jusqu'à quel point les idées de M. Graham peuvent se concilier avec les lois trouvées par M. Wiedemann et avec les faits qui semblent prouver qu'il peut y avoir endosmose sans aucune action chimique apparente.

Nous ne terminerons pas ce paragraphe sans rappeler les expériences de M. Napier sur l'endosmose électrique, qui, quoiqu'elles ne soient pas contraires à la manière dont le professeur Graham envisage ce phénomène, démontrent cependant la nécessité de l'étudier encore de plus près que ne l'a fait le célèbre chimiste anglais. L'une des plus remarquables consiste à placer les deux électrodes d'une pile chacun dans un vase poreux rempli, celui où plonge l'électrode positif, d'acide hydrochlorique, et celui où plonge le négatif, d'eau pure; les deux vases poreux étant eux-mêmes plongés dans de l'eau pure. Quand le courant a passé quelques heures, on trouve un peu d'acide hydrochlorique dans l'eau intermédiaire, mais pas une trace dans le vase négatif dans lequel, par contre, la quantité de liquide a sensiblement augmenté aux dépens de l'eau extérieure. En changeant les électrodes de place, on voit l'eau distillée passer de la cellule positive dans le vase intermédiaire, et l'acide qui communique avec l'électrode négatif n'éprouve pas de changement; l'endosmose ne se passant, comme dans le cas précédent, qu'entre les deux vases pleins d'eau pure. Il y a bien une décomposition chimique, mais elle est très-faible. Il n'est pas nécessaire, pour produire l'endosmose électrique, que le courant soit très-fort, pourvu qu'il soit suffisamment prolongé. M. Napier a réussi avec le courant d'un seul couple dont le zinc et le cuivre étaient plongés dans deux compartiments séparés par un diaphragme poreux et remplis chacun d'eau distillée, à faire passer au bout de quarante jours du compartiment positif au négatif un volume d'eau équivalent presque à 1 kilogramme; le courant n'accusait que 3° à un galvanomètre assez sensible mis dans le circuit, et quant à la décomposition de l'eau, elle était évidente, puisqu'au bout de quarante jours le zinc avait perdu $2^{gr}\cdot5$, ce qui représente la quantité oxydée pendant la durée de l'expérience.

§ 6. Effets chimiques de l'électricité ordinaire et de l'étincelle électrique.

Longtemps avant la découverte de la décomposition de l'eau

par la pile voltaïque, on avait réussi à produire des effets chimiques par l'électricité des machines électriques. Je ne parle pas des effets d'oxydation qui accompagnent l'incandescence des métaux par les décharges électriques, observés par Van Marum et par d'autres, parce que ce n'est qu'indirectement que l'électricité y contribue en réchauffant les fils métalliques. Mais en 1790, Paetz et Van-Troostwik avaient décomposé l'eau dans ses deux gaz constituants, en faisant arriver l'étincelle électrique au moyen d'un fil d'or très-fin, dans l'intérieur d'un tube de verre rempli d'eau, et en la faisant sortir au moyen d'uu second fil semblable immergé aussi dans l'eau à quelque distance du premier et communiquant avec le sol. Il faut une décharge assez forte pour opérer la décomposition, et l'emploi d'une bouteille de Leyde est nécessaire ; mais pour ne pas avoir une décharge qui brise le tube, on éloigne les deux fils d'or de manière que leurs extrémités soient à une distance l'une de l'autre de 4 centimètres environ ; puis on fait passer entre elles de petites étincelles dont on augmente graduellement la force en rapprochant peu à peu un conducteur qui communique avec l'un des fils de l'armure extérieure de la bouteille de Leyde, jusqu'à ce qu'on voie de très-petites bulles de gaz s'élever dans l'eau du tube. Dès qu'on a trouvé la puissance suffisante de l'électricité, on approche les deux fils d'or l'un de l'autre de manière à obtenir dans l'obscurité une petite lueur de 1 millimètre de longueur environ à leurs extrémités plongées dans l'eau. Cette distance est la plus favorable, parce que si l'on approche davantage les fils, l'étincelle passe d'un fil à l'autre à travers l'eau et brise le tube. Le passage de 500 étincelles produit une quantité de gaz considérable qui s'enflamme en ne laissant qu'un très-petit résidu, par le passage de l'étincelle; ce résidu provient de l'air qui était resté dissous dans l'eau, il ne se présente plus quand on a fait l'expérience quatre ou cinq fois de suite avec la même eau.

Cuthbertson et Pearson réussirent aussi, au moyen d'un très-grand nombre de décharges, à tirer de l'eau une petite quantité de gaz oxygène et hydrogène mélangés. Mais le physicien qui obtint les effets les plus décisifs de décomposition chi-

mique au moyen de l'électricité ordinaire, fut Wollaston qui, en 1801, peu de temps après la décomposition de l'eau par la pile, montra que sans bouteille de Leyde, sans même machines électriques puissantes, on pouvait réussir en se rapprochant autant que possible des conditions dans lesquelles on opère avec la pile voltaïque. Il imagina d'introduire un fil d'or dans un tube capillaire en lui donnant une pointe aussi aigüe que possible ; puis après avoir chauffé le tube au point de le faire adhérer à la pointe et de couvrir celle-ci de toutes parts, il l'usa graduellement jusqu'à ce qu'il pût, avec une loupe, découvrir l'extrémité de la tige d'or[1]. En faisant passer à travers l'eau des étincelles électriques soutirées du conducteur de la machine par des fils ainsi enveloppés, on réussissait à la décomposer au moyen d'étincelles de 3 millimètres de longueur avec une pointe qui n'avait pas plus de $\frac{1}{10}$ de millimètre de diamètre.

Si l'on diminue encore davantage ce diamètre, on peut obtenir un dégagement continu de petites bulles gazeuses, tout en établissant un contact complet entre le fil et le conducteur de la machine sans produire aucune étincelle visible entre eux. On peut avoir également deux courants de gaz en faisant passer l'électricité des deux côtés de l'eau à la fois par le moyen de pointes fines, dont l'une communique avec le conducteur positif, et l'autre avec le conducteur négatif de la machine. Toutefois le phénomène, malgré la similitude d'apparence, ne se passe pas de la même manière qu'avec la pile, car chaque fil dégage à la fois de l'oxygène et de l'hydrogène au lieu de les produire séparément.

Wollaston avait réussi cependant à décomposer des sels par l'électricité ordinaire comme par la pile; ainsi, ayant plongé deux fils d'argent recouverts de cire, sauf à leur extrémité même, dans une solution de sulfate de cuivre, et ayant fait communiquer l'un des fils avec le conducteur positif et l'autre avec le conducteur négatif d'une machine électrique, il obtint,

[1] Le même procédé est applicable aux fils de platine ; nous en avons fait usage pour avoir des électrodes qui présentassent le moins possible de points de contact avec les liquides (fig. 241).

au bout de cent révolutions de la machine, un dépôt de cuivre métallique au fil négatif, tandis que le fil positif ne présentait rien de semblable. De même ayant fait passer un courant d'étincelles entre deux pointes d'or très-fines placées à 25 millimètres de distance l'une de l'autre sur une carte colorée avec une forte teinture de tournesol, il remarqua, après un très-petit nombre de tours de la machine, une tache rouge très-visible autour du fil positif; en mettant le fil négatif près de la même tache, on la vit reprendre bientôt sa couleur.

Les expériences de Wollaston démontrent bien la puissance décomposante de l'électricité des machines ordinaires, mais laissent encore quelques doutes sur la nature du mode de décomposition. Est-ce une simple décomposition, ou cette décomposition est-elle accompagnée du transport des éléments qui caractérise l'effet du courant et que nous avons nommé électrolyse?

M. Bonijol avait, il est vrai, réussi à décomposer l'eau électrolytiquement au moyen de l'électricité atmosphérique, en employant un appareil à pointes fines avec lequel il l'avait aussi décomposée au moyen de l'électricité ordinaire. Il soutirait l'électricité atmosphérique par l'intermédiaire d'une pointe placée à l'extrémité d'une tige isolante et communiquant, par un fil métallique très-fin, avec l'appareil où s'opérait la décomposition. Le même physicien était aussi parvenu à décomposer la potasse et le chlorure d'argent solides en les plaçant dans un tube très-étroit et en les faisant traverser par une suite d'étincelles électriques amenées dans le tube au moyen de deux fils métalliques, l'un communiquant avec le conducteur de la machine, l'autre avec le sol; au bout de cinq à dix minutes, on trouvait dans le tube soit du potassium qui prenait feu à mesure qu'il était réduit, soit du sodium. Mais on ne pouvait pas non plus constater si la décomposition était électrolytique ou non.

Faraday, après avoir confirmé l'exactitude de celles des expériences de Wollaston, qui sont favorables à la décomposition électrolytique, réussit à la démontrer d'une manière beaucoup plus évidente. Il prit pour cela une plaque de verre sur laquelle il appliqua deux feuilles d'étain *a* et *b* (fig. 247), qu'il mit en communication au moyen de fils isolés *c* et *d*, l'une avec le con-

ducteur positif d'une machine électrique, et l'autre avec le conducteur négatif ou avec un appareil de décharge[1]; de chacune de ces lames d'étain partait un fil fin de platine bien en contact avec elles et aboutissant l'un en *p*, l'autre en *n*, formant

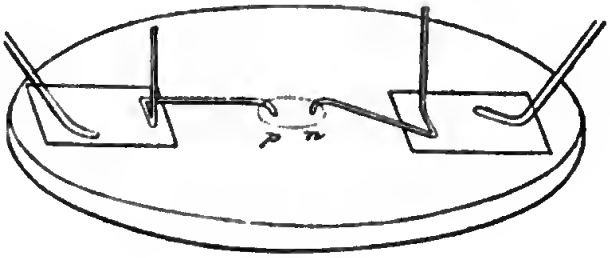


Fig. 247.

ainsi un pôle positif et un pôle négatif. Une goutte de sulfate de cuivre ayant été placée sur la lame de verre de manière que les pointes *p* et *n* pussent y plonger, il se précipita au bout de vingt tours de la machine, tellement de cuivre en *n* que le fil paraissait être tout de cuivre; il ne passait pas d'étincelles. De l'iodure de potassium mélangé avec l'amidon donnait bien vite de l'iode libre en *p*.

La meilleure manière d'opérer pour ce genre d'expériences est d'imbiber un morceau de papier joseph de la solution qu'on veut décomposer et de le placer entre les deux pointes *p* et *n*.

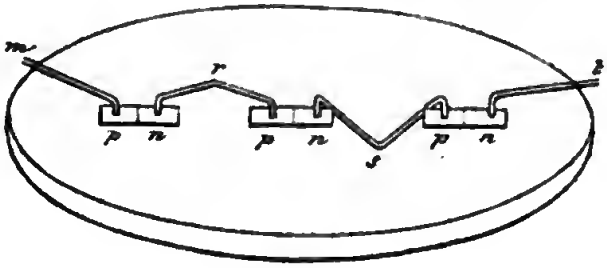


Fig. 248.

Ainsi l'on voit le papier imbibé d'une solution d'iodure de potassium dans l'amidon bleuir en *p* après qu'on a tourné à peine

[1] Nous avons déjà indiqué dans le tome Ier, que Faraday entend par appareil de décharge un système de conducteurs tels que les tuyaux destinés à amener le gaz de l'éclairage qui communiquent d'une manière parfaite avec le sol.

un seul demi tour de la machine; c'est le réactif électro-chimique le plus sensible qu'il soit possible de trouver. Un morceau de papier de tournesol imbibé de sulfate de soude rougit immédiatement en *p*, tandis que du papier de curcuma humecté de même rougit en *n* par l'effet du dégagement de l'alcali. On peut même imiter encore mieux les effets de l'électricité voltaïque en disposant (fig. 248), à la suite les uns des autres sur la plaque de verre, plusieurs petits morceaux de papier moitié de tournesol, moitié de curcuma, humectés avec le sulfate de soude, et en les réunissant par des conducteurs métalliques en platine *r* et *s*, de manière que les extrémités *n* de ces fils et du fil extrême *t* qui communique avec le conducteur négatif, soient en contact avec le papier de curcuma, et que les extrémités *p* des mêmes fils et du fil extrême *m* qui communique avec le conducteur positif, soient en contact avec le papier de tournesol, les points *r* et *s* reposant sur le verre. Après quelques tours de la machine, on voit, à la couleur que prennent les papiers, que l'acide s'est dégagé à tous les points *p* et l'alcali à tous les points *n*.

Il faut dans toutes ces expériences avoir soin d'éviter que l'étincelle ne passe par-dessus le papier humecté, parce qu'il est affecté par l'acide nitrique dont l'étincelle détermine la formation en opérant la combinaison de l'azote et de l'oxygène de l'air.

On peut obtenir les mêmes effets en ne se servant que d'un conducteur amenant l'une des électricités à l'un des bouts du papier humecté, et en faisant communiquer l'autre bout avec le sol ou simplement avec l'air au moyen d'un cordon de lin ou de chanvre aussi long qu'on le veut, humecté de la même solution que le papier et suspendu par des fils de soie de manière à être isolé. Le point où l'extrémité métallique du conducteur aboutit manifeste le dégagement de l'acide ou de l'alcali, suivant la nature de l'électricité qui y parvient. Un seul pôle métallique peut donc produire la décomposition et recevoir l'un des éléments pendant que l'autre se dégage quelque part à l'extrémité opposée du conducteur liquide, par exemple contre l'air qui peut servir lui-même de pôle, soit d'électrode. Faraday cite

plusieurs expériences qui prouvent la réalité de cette dernière supposition. Ainsi un morceau de papier de curcuma *a* et un morceau de papier de tournesol *b* (fig. 249), ayant été trempés dans une solution de sulfate de soude, furent placés sur de la cire entre deux aiguilles *p* et *n* qui étaient en communication,

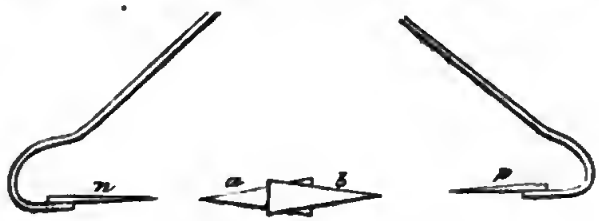


Fig. 249.

l'une avec le conducteur de la machine au moyen d'un fil de métal, et l'autre avec l'appareil de décharge; l'intervalle entre chaque pointe et l'extrémité de la bande de papier correspondante était de 12 millimètres environ; la pointe *p* était opposée au papier de tournesol, et la pointe *n* au papier de curcuma. Dès qu'on eut touché la machine, la décomposition eut lieu; l'extrémité *b* manifesta la réaction acide, et l'extrémité *a* la réaction alcaline, ce qui indique que l'électricité positive arrive de la pointe *p* à travers l'air jusqu'en *b* où elle pénètre dans le papier humecté, et la négative de la même manière de la pointe *n* jusqu'en *a*. Dans ce cas l'air fait également des deux côtés l'office d'électrode; résultat qui ne peut être obtenu qu'au moyen de l'électricité ordinaire, seule capable de traverser un conducteur aussi imparfait que l'air. On peut donner à cette dernière expérience une forme encore plus piquante et qui l'assimile aux expériences analogues qu'on fait avec la pile voltaïque, en pla-

Fig. 250.

çant (fig. 250) une série de petites bandes de papier tournesol et curcuma *a b*, humectées d'une solution de sulfate de soude et disposées à une certaine distance les unes des autres, sur une

lame de verre entre les pointes métalliques *p* et *n* par où arrivent l'électricité positive et la négative. Toutes les pointes du papier tournesol, aussi bien que celles du papier curcuma, sont rougies, ce qui prouve que les petites couches d'air interposées entre les bandes de papier font l'office de conducteurs et d'électrodes, comme le faisaient les fils métalliques de la fig. 247.

Les résultats qui précèdent sont parfaitement d'accord avec la théorie que nous avons donnée de l'électrolyse. Les éléments d'un électrolyte séparés par le courant et qui sont transportés par voie de décomposition et de recomposition successives se déposent là où ils ne trouvent plus un élément avec lequel ils puissent se combiner; ordinairement c'est contre la surface d'un métal que ce dépôt a lieu; mais nous avons vu que dans plusieurs cas, il peut avoir lieu contre la surface d'un liquide, comme, par exemple, dans le cas de la décomposition du sulfate de magnésie, dans lequel la magnésie s'arrête contre l'eau placée entre le sulfate et le pôle négatif et n'atteint pas ce pôle. Il n'est donc pas étonnant que l'acide du sulfate de soude, d'une part, et son alcali, de l'autre, s'arrêtent contre la surface de la couche d'air interposée entre les bandes de papier et les pôles positif et négatif, puisqu'ils ne peuvent se combiner ni avec l'oxygène ni avec l'azote de cet air.

Mais si l'électricité ordinaire peut, ainsi que l'a prouvé Faraday, opérer la décomposition électrolytique à la façon du courant de la pile, il n'en est pas moins vrai qu'elle produit aussi la décomposition sans transport des éléments, par exemple dans les expériences de Wollaston sur la décomposition de l'eau. Cependant nous devons ajouter que Davy avait réussi à séparer les deux gaz constituants de l'eau en y plongeant l'extrémité bien fine d'un fil de platine qui recevait l'électricité d'une machine électrique, et en faisant dissiper cette électricité dans l'air au moyen de filaments de coton; il recueillait, à ce qu'il paraît, les gaz oxygène et hydrogène séparés, mais il ne dit point où se déposait celui des deux gaz qui ne se dégageait pas au fil de platine. Cette expérience assez douteuse est la seule dans laquelle on ait réussi à obtenir les gaz séparés dans la décomposition de l'eau par l'électricité ordinaire; dans toutes les autres

on les obtient mélangés. L'explication de ce fait tient à ce qu'il faut distinguer, dans les décompositions opérées par l'électricité ordinaire, celles qui résultent de la transmission régulière et continue de l'électricité, de celles qui sont dues à l'effet calorifique de l'étincelle agissant sur les molécules du liquide en contact avec le fil métallique d'où elle sort. Les deux modes peuvent se présenter simultanément et dans des proportions qui dépendent des circonstances de l'expérience plus favorables à l'un ou à l'autre. Le mode électrolytique est favorisé par les formes très-pointues des électrodes qui permettent un écoulement continu de l'électricité semblable à un courant; mais il faut en outre que le liquide soit bon conducteur; c'est pourquoi il a lieu avec des dissolutions salines ou acides. Le mode non électrolytique se présente surtout quand les liquides sont conducteurs imparfaits, tels que l'eau distillée, ou même quand ils sont presque totalement isolants, tels que l'alcool et les huiles.

Nous avons déjà vu que Morgan avait décomposé l'alcool et les huiles en y faisant passer des décharges électriques [1]. Nous avons également vu que Davy avait réussi, au moyen de l'étincelle voltaïque produite entre deux pointes de charbon plongées dans divers liquides, à décomposer ces liquides, qu'ils fussent ou non conducteurs, preuve que la décomposition n'était pas, du moins dans le plus grand nombre des cas, électrolytique, mais bien un effet de la chaleur dégagée entre les pointes. M. Melly a examiné de plus près ce mode de décomposition. Il faisait usage d'un tube fermé par le bas au moyen d'un liége, à travers lequel pénétrait un fil métallique, mis par son extrémité extérieure en communication avec l'un des pôles d'une pile de Grove de 5 à 6 couples, et dans ce tube rempli du liquide soumis à l'expérience plongeait un autre tube plus petit plein du même liquide, mais fermé par le haut au moyen d'un liége traversé également par un fil de métal communiquant avec l'autre pôle de la pile. Avec la main, on pouvait établir et rompre le contact entre les extrémités des deux fils plongés dans le

[1] Tome II, page 81.

liquide, et à chaque rupture une étincelle était produite. Il est facile d'obtenir plus d'une centaine de ces étincelles par minute, dès que la main est accoutumée à cette espèce de mouvement de va et vient. Au reste, on peut au moyen d'un petit levier mis en communication avec une roue dentée qu'on fait mouvoir à la main, opérer très-facilement l'établissement et la rupture du contact entre les deux fils; on peut même mettre la roue dentée dans le liquide ainsi qu'un petit ressort métallique qui presse constamment sur la circonférence; ce ressort communique avec l'un des pôles, l'axe de la roue avec l'autre, et on obtient ainsi, en faisant tourner la roue, une série d'étincelles dont le nombre dépend et de celui de ses dents et de la vitesse avec laquelle on la fait tourner[1]. Par ces divers procédés M. Melly a réussi à décomposer l'huile d'olive, l'essence de térébenthine, l'éther sulfurique, l'alcool absolu, l'alcool à 36°, le naphte ordinaire, le naphte pur, le sulfure de carbone, le chlorure de soufre et l'eau distillée, substances dont aucune ne pouvait être décomposée électrolytiquement par le courant de la pile employée pour produire l'étincelle.

On observe, en général, dans ces expériences deux faits différents : la production d'une vapeur saturée du liquide lorsqu'il est passablement volatile, et sa décomposition. L'essence de térébenthine ne se vaporise pas sensiblement, mais on y voit un dégagement de grosses bulles gazeuses qui sont un mélange d'hydrogène et d'hydrogène carboné, et un dépôt de charbon qui reste en suspension dans le liquide; l'huile d'olive et le naphte donnent des résultats assez semblables à celui qu'on obtient avec l'essence de térébenthine. L'alcool et surtout l'éther, produisent un dégagement considérable de bulles de vapeur outre celles du gaz, qui, arrivées au haut du tube, se condensent peu à peu par le refroidissement de l'appareil. Le dépôt de charbon est assez faible. Le sulfure de carbone ne donne aucun gaz; le chlorure de soufre en dégage un peu; dans ces deux liquides les fils métalliques, qui sont de cuivre,

[1] Voyez tome I, page 299, figure 131, une roue semblable à celle dont il s'agit.

deviennent gris par la formation d'un sulfure, et du charbon en lamelles d'un gris brillant reste en suspension dans le premier, tandis qu'un peu de soufre d'un jaune sale se trouve dans le second. De l'eau distillée, parfaitement pure et privée d'air avec beaucoup de soin, donne lieu à un dépôt pulvérulent, qui est du protoxyde de cuivre, et à un dégagement gazeux, composé pour les trois quarts d'un mélange d'oxygène et d'hydrogène, et pour un quart d'hydrogène pur équivalent probablement à l'oxygène du protoxyde de cuivre. En substituant des fils de platine aux fils de cuivre dans l'expérience de l'eau distillée, on n'obtient presque point de gaz, mais un dépôt assez abondant d'une poudre noire qui n'est autre chose que du platine très-divisé, ainsi qu'il est facile de le constater. Cette expérience démontre que, sous l'influence de la chaleur de l'étincelle voltaïque, le platine a été alternativement oxydé et réduit par l'hydrogène de l'eau qui, par conséquent, a été décomposée de la même manière que la vapeur d'alcool ou d'éther est décomposée dans la lampe aphlogistique, par la chaleur du platine incandescent. Entre deux fragments du coke qu'on retire de la fabrication du gaz de l'éclairage, on obtient une étincelle qui décompose très-bien l'eau distillée avec une production d'hydrogène et d'un peu d'acide carbonique, la plus grande partie de cet acide restant dissous dans l'eau.

On peut avec avantage remplacer dans toutes ces expériences l'étincelle de la pile par l'étincelle d'induction, qui produit les mêmes effets avec un nombre de couples voltaïques bien moins considérable; un seul suffit avec un bon appareil d'induction. Toutefois les effets sont plus complexes, parce que les courants d'induction agissent souvent sur le liquide électrolytiquement en même temps qu'ils le décomposent par l'étincelle. C'est ce qui explique les résultats anomaux que Grove a obtenus en décomposant, au moyen des courants d'induction de l'appareil de Ruhmkorff [1], de l'eau distillée, soit pure, soit légèrement acide, soit fortement acide. Les électrodes

[1] Voyez tome I, page 351.

étaient des fils de platine très-fins scellés dans des tubes de verre, de façon que leur extrémité était incrustée dans le bout même du tube sans le dépasser. Le produit gazeux accumulé autour de chaque pointe était un mélange d'oxygène et d'hydrogène avec excès tantôt de l'un, tantôt de l'autre gaz; cependant, quand on réunit les mélanges gazeux accumulés autour de chacun des deux électrodes, on trouve, après les avoir fait détonner, un excès d'hydrogène si l'eau renferme une très-faible quantité d'acide sulfurique, et un excès d'oxygène si elle en renferme au delà de la proportion qui lui donne son maximum de conductibilité. Quand elle en renferme exactement cette proportion, il n'y a presque pas excès ni de l'un ni de l'autre gaz. Il faut remarquer encore que les volumes gazeux ne sont jamais égaux sur les deux électrodes : c'est tantôt à l'un, tantôt à l'autre, qu'ils sont plus considérables. Si, au lieu de pointe, on prend une lame de platine pour l'un des électrodes, il n'y a pas dégagement sensible de gaz autour de la lame, tandis qu'il y en a autour de l'autre électrode qui est resté une pointe, comme lorsqu'ils étaient des pointes l'un et l'autre. Tous ces effets sont du même genre que ceux que nous avons décrits dans le § 4, avec cette différence que, indépendamment de la présence des courants alternatifs qui agissent électrolytiquement, portant à la fois de l'oxygène et de l'hydrogène à chacun des électrodes où ils éprouvent une recomposition partielle et même quelquefois totale, comme avec la lame, l'intervention de l'étincelle qui, avec l'appareil de Ruhmkorff est très-forte, vient compliquer encore les résultats.

Il est probable que l'excès de l'hydrogène, observé dans quelques cas, tient à la formation d'un peu d'eau oxygénée, comme celui de l'oxygène qui a lieu quand l'eau acidulée est concentrée, tient également à la formation d'un produit secondaire, tel que de l'hydrogène sulfuré. L'observatiou que M. Grove a faite, qu'il se dépose une poudre noirâtre, qui est du platine divisé, quand il a fait passer pendant un très-grand nombre d'heures (30 à 40) non consécutives, la décharge de l'appareil de Ruhmkorff, au moyen d'une lame et d'une pointe servant l'électrodes, à travers de la vapeur d'eau provenant d'eau distillée placée sous le vide,

est une preuve de la décomposition et recomposition alternatives de l'eau.

Ainsi, comme le remarque avec raison M. Masson, à la suite de quelques recherches faites également avec l'appareil de Ruhmkorff, tous ces résultats, ainsi que ceux qu'il a lui-même obtenus, confirment la distinction que nous avons établie entre la décomposition *polaire* ou *électrolytique* et la décomposition *calorifique*. Ce physicien a observé que la décomposition est beaucoup plus abondante là où l'électrode est lumineux, par exemple au négatif et à celui qui est terminé en pointe quand l'autre a la forme d'une boule, parce que les deux modes de décomposition s'y trouvent réunis. Il cite plusieurs exemples du second mode de décomposition qu'il a étudié, comme M. Melly l'avait déjà fait, en opérant sur des substances non conductrices. M. Quet, qui a fait des expériences du même genre que celles de M. Masson et de M. Grove, remarque que le fil de platine et le verre qui l'entoure s'altèrent et se fusent, après avoir servi à la décomposition de l'eau avec l'appareil de Ruhmkorff.

Il était important de prouver directement l'existence de la décomposition calorifique, car on pouvait toujours soupçonner qu'elle était un effet même de l'électricité et non pas de la chaleur que cette électricité dégage. C'est à M. Grove qu'on doit d'avoir démontré que la décomposition, dans le cas où elle n'est pas électrolytique, est bien due à l'action de la chaleur. Il est

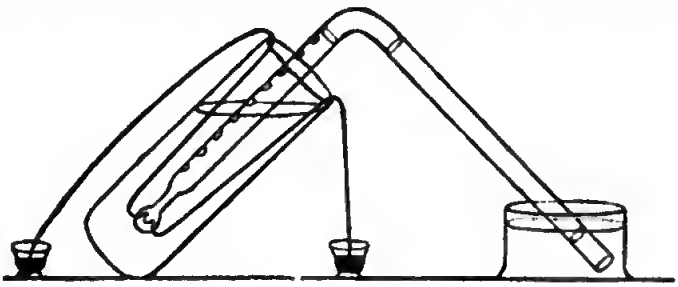


Fig. 251.

d'abord parvenu, après divers tâtonnements, à décomposer l'eau, en faisant rougir, au moyen d'un courant électrique, un fil de platine inséré dans le bas d'un tube rempli d'eau, et ré-

tréci immédiatement au-dessus du fil, de façon à ne laisser que l'espace strictement nécessaire à la vapeur formée par la chaleur du fil pour monter, et à l'eau pour redescendre (fig. 251). Deux couples suffisent pour que l'air, étant expulsé, on voie l'eau bouillir et le fil devenir incandescent au milieu de la vapeur, puis on aperçoit de petites bulles gazeuses se séparer et monter au sommet du tube, d'où elles se rendent, au moyen de sa courbure, sous une cloche; le phénomène n'a pas lieu d'une manière continue, mais seulement par saccades. Le gaz est un mélange d'hydrogène et d'oxygène. Il est évident que la décomposition de l'eau est bien un effet de la chaleur du fil et non du courant qui la traverserait, car ce courant est incapable d'être transmis à travers l'eau distillée, et l'on n'obtient aucun effet en séparant le fil de platine à son milieu, et en vaporisant l'eau au moyen de la flamme d'une lampe à alcool appliquée extérieurement, tandis que, en la vaporisant de la même manière, si le fil est continu et que le courant le traverse, on détermine la formation d'une bulle de gaz, en remplissant le tube (fig. 252) d'eau bien distillée et soigneusement purgée d'air. Seulement il faut transvaser la bulle dans un autre vase pour en obtenir une seconde; on ne peut pas, lors même qu'on maintient l'incandescence longtemps, augmenter le volume du mélange gazeux au delà d'une quantité très-limitée, ce qui tient probablement à ce que, restant alors en contact avec le fil de platine, il détonne et reforme l'eau. Dans l'expérience de la fig. 250 il n'en était pas de même, parce que les bulles gazeuses s'échappaient hors du tube à mesure de leur formation. Au reste, le mode d'opérer de la fig. 252 exclut toute idée de décomposition électrolytique, puisque le fil de platine incandescent n'est point en contact avec l'eau, mais uniquement avec une atmosphère non conductrice de vapeur sèche.

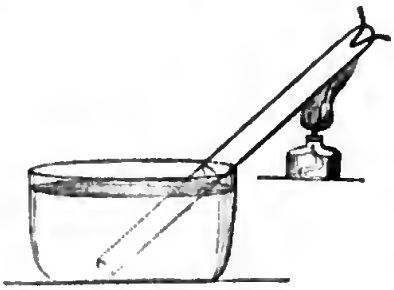


Fig. 252.

Après ces divers essais, M. Grove, voulant exclure l'emploi

du courant électrique même comme source de chaleur, se procura un tube d'argent de 24 centim. de longueur sur 1 de diamètre environ, à l'extrémité supérieure duquel était soudée une tête en platine munie d'un petit tube également en platine soudé et fermé à l'or (fig. 253). L'appareil fut rempli d'eau convenablement préparée, et celle-ci fut ensuite soumise à l'ébullition pour chasser l'air adhérent aux parois. Le tube fut alors renversé et chauffé à son extrémité supérieure par la flamme d'un chalumeau; en le renversant sous l'eau, on recueillit une petite bulle détonnante. Avec un globule de platine qu'on fait fondre à l'extrémité d'un gros fil, on détermine également la décomposition de l'eau en l'y plongeant au moment où il arrive à l'état de fusion. Mais pour avoir un dégagement continu de gaz du sein de l'eau soumise à l'action seule de la chaleur, Grove construisit l'appareil suivant (fig. 254), dans lequel *a* et *b* sont deux tubes d'argent longs de 9 cent. et de 8 millim. de diamètre, soudés par deux culots de platine à un tube plus étroit également en platine. Le tube *a* est bouché à son extrémité, et le tube de verre *d* recourbé est ajusté au moyen d'une bande de vessie à l'extrémité du tube *b*. Le tout est rempli d'eau purgée d'air, et après avoir, au moyen de la chaleur, déterminé

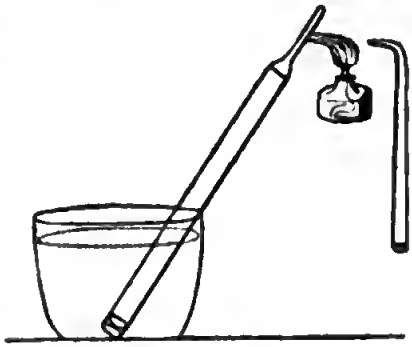


Fig. 253.

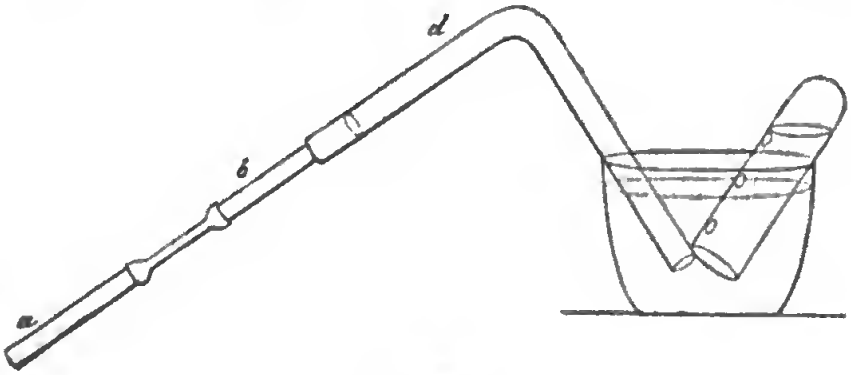


Fig. 254.

l'expulsion de l'air du tube *a*, on plonge dans une capsule d'eau bouillante l'extrémité du tube de verre. On chauffe au moyen d'une lampe à alcool d'abord le tube *b*, puis le tube *a* jusqu'à complète ébullition; aussitôt on lance sur le tube de jonction de platine le dard d'un chalumeau à gaz. Lorsque la température a atteint d'aussi près que possible le point de fusion du platine, le gaz se dégage en même temps que la vapeur, de manière à remplir l'appareil et même à sortir au dehors; on le recueille alors dans une éprouvette. Il est pour les $\frac{7}{10}$ un mélange d'oxygène et d'hydrogène dans les proportions qui forment l'eau; le résidu est de l'azote avec un peu d'oxygène qui provient de l'air dissous dans l'eau.

Ainsi, sous l'influence du platine incandescent la chaleur seule, sans aucune influence électrique, peut décomposer l'eau. On ne peut attribuer ce phénomène à la force catalytique du platine, puisqu'au contraire cette force déterminerait la combinaison loin de produire la décomposition; c'est donc bien un effet direct de la chaleur.

L'action sur les gaz de la chaleur électrique présente aussi des phénomènes curieux qu'il importe d'étudier. C'est également ce qu'a fait M. Grove en logeant successivement diverses substances gazeuses dans un tube semblable à celui de la figure 251, et en rendant incandescent au moyen d'un courant voltaïque le fil de platine qui traverse le haut du tube. Les expériences étaient tantôt faites sur l'eau, tantôt sur le mercure. L'oxygène, l'azote, l'hydrogène et l'acide carbonique n'éprouvaient pas d'altération sensible. Le bioxyde d'azote recueilli sur l'eau distillée se contractait de $\frac{1}{3}$ de son volume initial; le résidu était de l'azote, et de l'acide nitrique se trouvait en dissolution dans l'eau. Le protoxyde d'azote se décomposait en azote et oxygène, en augmentant de 0,35 de son volume primitif. L'ammoniaque doublait de volume, l'eau ne l'absorbait plus, il était décomposé dans ses trois parties d'hydrogène et une d'azote. Le gaz oléfiant subissait une légère contraction de volume, accompagnée d'un faible dépôt de charbon, mais la décomposition du gaz n'était point complète. Le chlore et le cyanogène donnaient d'épaisses

fumées blanches qui provenaient probablement de leur action sur le platine.

Longtemps avant Grove, on avait déjà réussi à décomposer les gaz par l'étincelle électrique, mais en montrant que le même effet est produit par le platine incandescent, Grove a prouvé que c'est bien à la chaleur de l'étincelle et non pas à ce qu'elle est électrique que le phénomène est dû. Le protoxyde et le deutoxyde d'azote ainsi que l'ammoniaque sont décomposés par l'étincelle comme par le platine incandescent ; mais l'étincelle décompose en outre les hydrogènes sulfuré et phosphoré, le volume d'hydrogène ne change pas, mais il se dépose du soufre et du phosphore. Les gaz hydrogènes carbonés et l'acide hydrochlorique sont aussi décomposés ; avec l'acide carbonique on remarque une augmentation de volume et la formation d'un peu d'oxyde de carbone, mais la décomposition n'est jamais complète.

Une chose assez remarquable, c'est que cette même étincelle électrique qui décompose les gaz composés en les traversant, détermine de la même manière la combinaison des gaz élémentaires. L'appareil qui sert à produire ces combinaisons est le même que celui au moyen duquel on produit la décomposition. C'est un tube en verre dont les parois doivent être très-fortes, d'un centimètre d'épaisseur (fig. 255), fermé à son sommet et ouvert à son autre extrémité ; il doit être percé, dans la portion voisine du sommet, de deux petits trous par lesquels on introduit deux fils métalliques de platine ou de cuivre, qui y sont hermétiquement scellés. Les extrémités intérieures des deux fils sont vis-à-vis l'une de l'autre, laissant entre elles un intervalle de 1 à 2 millimètres ; c'est entre elles qu'on fait jaillir l'étincelle, en faisant communiquer les extrémités extérieures des fils, l'une avec l'armure intérieure, l'autre avec l'armure extérieure d'une bouteille de Leyde. On remplit le tube ordinairement de mercure plutôt que d'eau, à cause des gaz so-

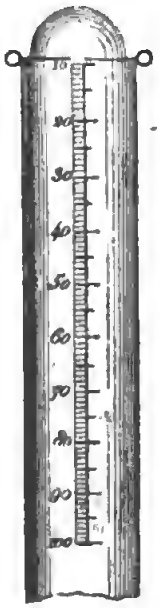


Fig. 255.

lubles, puis on y fait passer les gaz dont on veut déterminer la combinaison, en ayant bien soin de ne pas en introduire assez pour chasser tout le mercure, dont il faut laisser toujours quelques centimètres au bas du tube; celui-ci plonge par sa base dans une petite cuve où se trouve du mercure, qui remonte dans son intérieur lorsque la combinaison des gaz a déterminé une diminution de volume dans la masse gazeuse, ainsi que cela arrive le plus souvent.

La combinaison qui s'opère le plus facilement, au moyen de l'étincelle électrique, est celle de deux volumes d'hydrogène et d'un volume d'oxygène; elle est accompagnée d'une violente détonation qui risque de briser le tube de verre s'il n'est pas très-fort, et le mercure monte rapidement jusqu'au haut du tube pour remplir l'espace devenu vide par la condensation de la vapeur d'eau formée par la combinaison des deux gaz. Aussi appelle-t-on mélange explosif le mélange d'oxygène et d'hydrogène dans les proportions qui constituent l'eau. Si l'un des gaz est en excès, il n'empêche pas la combinaison qui s'opère toujours entre deux volumes d'hydrogène et un volume d'oxygène, avec un excédant du gaz qui se trouve en proportion trop forte dans le mélange. Toutefois, il ne faut pas que le gaz en excès dépasse sept fois le volume du mélange explosif, s'il est de l'hydrogène, et douze fois s'il est de l'oxygène; il n'y a plus alors de combinaison. De même, s'il y a plus de dix volumes d'air atmosphérique mélangés avec un volume de mélange explosif, celui-ci ne détonne pas sous l'action de l'étincelle électrique. Cette influence négative de la présence d'un troisième gaz est générale, mais la proportion du gaz nécessaire pour empêcher la combinaison de l'oxygène et de l'hydrogène varie suivant sa nature. Il est probable que cet effet tient à l'action refroidissante qu'exerce sur l'étincelle la quantité considérable de gaz au milieu de laquelle est, pour ainsi dire, noyé le mélange explosif; tel est du moins le cas quand le gaz en excès est de l'hydrogène, de l'oxygène ou de l'air atmosphérique. Mais il peut aussi arriver que ce gaz exerce lui-même une action sur l'oxygène ou l hydrogène du mélange, et alors il en faut une proportion beaucoup moindre pour arrêter l'explo-

sion; c'est ce qui arrive avec le gaz acide hydrochlorique, le gaz acide sulfureux et l'ammoniaque.

Nous devons remarquer, en effet, que dans le phénomène de la combinaison de l'oxygène et de l'hydrogène par l'étincelle électrique, la chaleur de l'étincelle en déterminant la combinaison des premières molécules gazeuses qu'elle rencontre, devient ainsi à son tour elle-même la cause d'un grand développement de chaleur qui produit la combinaison d'autres molécules, et ainsi de suite, de sorte que la combinaison est pour ainsi dire instantanée, phénomène qu'on peut, en conséquence, attribuer à la grande chaleur qui accompagne la combinaison de l'oxygène et de l'hydrogène. Mais quand il s'agit d'autres gaz, tels que l'azote et l'oxygène, par exemple, qui ne produisent par leur combinaison que peu de chaleur, il faut pour les combiner ensemble un très-grand nombre d'étincelles, parce que chaque étincelle ne détermine la combinaison que de celles des molécules des deux gaz qu'elle rencontre directement. C'est ce qu'avaient observé Priestley et après lui Cavendish, qui avaient réussi les premiers à former de l'acide nitrique en faisant passer une série d'étincelles électriques à travers de l'air atmosphérique. Pour faire cette expérience, il faut se servir d'un tube recourbé en verre (fig. 256), de 23 millimètres de diamètre environ, rempli de mercure, sauf dans sa partie coudée supérieure où on laisse un peu d'air atmosphérique, et plongeant par ses deux extrémités dans des vases de verre séparés contenant également du mercure. On met en communication avec le sol le mercure de l'un des vases, et celui de l'autre aboutit au conducteur d'une machine électrique au moyen de laquelle on fait passer un courant d'étincelles à travers l'air situé dans la partie supérieure du tube. A mesure que le volume de l'air diminue, on en introduit du nouveau. Cavendish, après avoir opéré avec cet appareil pendant quinze jours, une demi-heure chaque jour, trouva que l'oxygène et l'azote s'é-

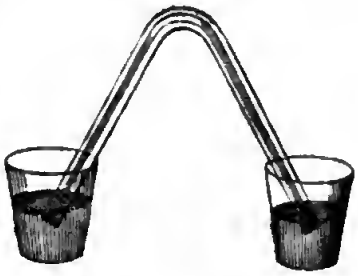


Fig. 256.

taient combinés dans la proportion de sept volumes d'oxygène et de trois d'azote pour produire l'acide nitrique dont d'ailleurs il était facile de constater la présence, soit par son action sur la teinture bleue végétale, soit par la formation d'un nitrate de potasse quand on introduisait une solution de potasse dans le tube.

On détermine également par l'étincelle électrique la combinaison du chlore et de l'hydrogène à volumes égaux pour former l'acide hydrochlorique; la combinaison est immédiate comme avec le mélange explosif, et est accompagnée d'une forte détonation.

Les gaz simples ne sont pas les seuls qui forment des combinaisons quand on fait passer une étincelle électrique à travers leur mélange. On peut déterminer également de nouvelles combinaisons entre un gaz composé et un gaz simple. Voici un tableau qui renferme quelques-uns des résultats les plus importants obtenus de cette manière :

2 vol.	oxyde de carbone et		1 vol.	oxygène	donnent	2 vol. acide carbonique.
2 »	hydrogène protocarboné	et	2 »	oxygène	»	2 vol. oxyde de carbone et 2 vol. hydrogène
2 »	id. id	et	4 »	chlore	»	8 vol. acide hydrochlorique, un dépôt de charbon.
2 »	hydrogène bicarboné	et	6 »	oxygène	»	4 vol. acide carbonique, un dépôt d'eau.
1 »	cyanogène	et	2 »	oxygène	»	2 vol. acide carbonique, 1 vol. azote.
2 »	acide hydrocyanique	et	2 ½ vol.	oxygène	»	2 vol. acide carbonique, 1 vol. azote, et un léger dépôt d'eau.

Nous voyons, par ce qui précède, que la même cause qui détermine la décomposition d'un gaz composé peut produire une nouvelle combinaison quand ce gaz composé est en présence

d'un autre. L'un des phénomènes est une conséquence de l'autre, en ce sens que l'étincelle électrique, en troublant par son passage l'équilibre chimique d'un gaz, facilite par conséquent la formation de tout nouveau composé. La propriété de l'étincelle, ou plutôt de la chaleur qu'elle introduit au sein des particules gazeuses, est donc de troubler l'équilibre chimique probablement en imprimant aux atomes, suivant la théorie que nous avons déjà énoncée en une ou deux occasions, un mouvement de rotation plus rapide que celui qu'ils possèdent à la température ordinaire.

Il est facile de prouver que c'est bien à la chaleur qu'est due la propriété que possède l'étincelle de déterminer les combinaisons aussi bien que les décompositions ; il n'y a qu'à remplacer dans l'appareil (fig. 256) les deux pointes de platine par un fil fin et continu du même métal qui traverse le tube ; en le faisant rougir au moyen d'un courant électrique, on obtient les mêmes effets de combinaison qu'avec l'étincelle.

Une circonstance qui influe sur la facilité des gaz à se combiner par l'effet de l'étincelle électrique est leur densité. Grotthus a trouvé qu'un mélange de chlore et d'hydrogène ne détonne plus quand il est réduit par la raréfaction au sixième de sa densité. Il faut pousser cette raréfaction jusqu'au delà du seizième de sa densité, pour faire perdre au mélange d'hydrogène et d'oxygène sa faculté détonante. La raréfaction résultant de l'élévation de la température produit des effets semblables, ce qui prouve que l'augmentation de la chaleur ne compense pas l'affaiblissement qui résulte, dans l'action mutuelle des particules, de leur plus grand écartement mutuel. Il en serait tout autrement si, en réchauffant les gaz, on les empêchait de se dilater de manière que leur force élastique seule, et non leur volume, pût s'accroître ; il est bien probable qu'alors l'action de l'étincelle électrique, pour déterminer leur combinaison, serait facilitée. Des expériences de ce genre n'ont jamais été faites ; elles mériteraient d'être tentées.

Indépendamment des effets chimiques que l'électricité produit indirectement sur les gaz par la chaleur qu'elle fait pénétrer dans leurs particules, M. Grove a trouvé qu'elle peut en

déterminer de plus directs et qui semblent, jusqu'à un certain point, être électrolytiques. C'est en faisant usage des courants d'induction produits par l'instrument de Ruhmkorff[1] qu'il est parvenu aux résultats intéressants que nous allons décrire. Les expériences étaient faites au moyen d'un appareil semblable à celui de la figure 220. Une plaque d'argent fut placée sur le support de la cloche, et une aiguille d'acier fut fixée à l'extrémité de la tige à une distance de 2 à 3 millimètres environ de la plaque. Le courant d'induction était transmis de la plaque à l'aiguille; le milieu était de l'air raréfié à 18 millimètres environ, mélangé avec de l'hydrogène et un peu de vapeur d'eau; on vit se former sur la plaque, quand elle fut positive, une tache circulaire d'oxyde d'argent présentant successivement des teintes jaune, orangée ou bleue. Le sens du courant étant renversé, la tache disparut et la surface de l'argent redevint parfaitement nette; on pouvait toutefois encore distinguer la place qu'avait occupée la tache. Dans l'air raréfié sans mélange d'hydrogène, l'oxydation avait lieu quel que fût le sens du courant, mais elle était plus rapide quand la plaque était positive. Dans l'hydrogène pur raréfié, il n'y avait aucune oxydation, mais la surface de la plaque finissait par se dépolir légèrement. L'azote se conduisit comme l'hydrogène; quand il était parfaitement pur, il n'y avait pas trace d'oxydation; mais dès qu'il était mélangé avec un peu d'oxygène, alors la plaque, quand elle était positive, commençait à s'oxyder. L'aiguille d'acier fut remplacée par des fils de cuivre, d'argent et de platine, sans que les phénomènes fussent sensiblement modifiés. En substituant à la plaque d'argent des plaques de bismuth, de plomb, d'étain, de zinc et de fer, on obtint des effets semblables, à l'intensité près. Le platine seul n'éprouva aucun effet.

Pour mieux étudier la formation des taches, M. Grove, après quelques essais, opéra avec une atmosphère raréfiée comme dans les expériences précédentes, et formée d'un mélange d'un volume d'oxygène et de quatre d'hydrogène. La plaque fut rendue positive, et l'on amena l'extrémité inférieure de l'aiguille d'acier à

[1] Tome I, page 395, fig. 150.

des distances de la plaque successivement égales à $0^{mm}51$; $1^{mm}02$, $1^{mm}52$, $2^{mm}03$, $2^{mm}54$; on obtint ainsi successivement les apparences *a*, *b*, *c*, *d*, et *e*, de la fig. 257. La couleur de la tache centrale était jaune verdâtre au centre, et bleue verdâtre sur les bords; ensuite venait un anneau d'argent non oxydé, puis un anneau circulaire rouge cramoisi, tirant vers

Fig. 257.

l'orangé sur le bord intérieur, et vers le pourpre foncé sur le bord extérieur. Quelquefois, au milieu de la tache centrale, on voyait un petit espace circulaire où l'argent paraissait parfaitement poli (fig. 257, apparences *f* et *g*), et qui se produisait quand la plaque était négative, ce petit espace était entouré d'une auréole sombre et mal définie. Les taches *h* et *i* proviennent, la première, de la décharge transmise par un fil de platine enfermé dans un tube de verre, à la manière de Wollaston, décrite plus haut; la seconde, de la décharge transmise par une aiguille d'acier; la plaque d'argent était positive, les distances parcourues par les décharges étaient de 2 millimètres, le récipient contenait un mélange de 1 volume d'oxygène et de 5 d'hydrogène, sous une pression de 12 millimètres. Enfin l'apparence *k* est le résultat d'une expérience dans laquelle un fil de cuivre de 1 millimètre de diamètre avait été fixé avec de la cire dans une position horizontale à $\frac{1}{2}$ millimètre au-dessus de la plaque d'argent, l'extrémité du fil de platine était elle-même à $\frac{1}{2}$ millimètre au-dessus du fil de cuivre. On voit que l'interposition du fil de cuivre a partagé la tache en deux portions égales, séparées par un intervalle qui est resté net.

Les phénomènes décrits par M. Grove sont analogues en

partie à ceux que j'avais observés en opérant de la même manière, mais au moyen d'une pile à haute tension [1]; ils sont seulement plus nombreux et plus variés; toutefois, j'avais remarqué la formation de la tache bleue circulaire, même sur une lame de platine dans de l'air raréfié, et sa non apparition dans une atmosphère d'hydrogène. Tous ces effets me paraissent provenir essentiellement de la température élevée qu'éprouvent les points des conducteurs métalliques d'où sort l'électricité positive, jointe à la propriété plus oxydante que le passage de la décharge développe chez l'oxygène, et dont l'étude fait l'objet du paragraphe suivant. Quant aux effets de réduction par l'hydrogène, ils sont également faciles à comprendre; ce qui l'est moins, c'est de savoir pourquoi, dans une atmosphère d'hydrogène et d'oxygène dans laquelle ce dernier gaz est en petite proportion, la plaque ne s'oxyde qu'autant qu'elle est positive, et non quand elle est négative. Quand l'oxygène est plus abondant, elle s'oxyde aussi bien que dans l'air atmosphérique. Serait-ce que, sous l'influence des décharges, l'oxygène et l'hydrogène acquerraient, par l'effet d'une polarisation particulière, une tendance à se rendre, l'un à l'électrode positif, l'autre au négatif? M. Grove serait disposé à admettre cette opinion, et à reconnaître par conséquent dans les gaz une espèce de polarité électro-chimique. Je présume plutôt que la différence de température qui se manifeste entre les deux électrodes, jointe à la propriété qu'acquiert l'oxygène, peuvent rendre compte de ces oxydations et de ces réductions que nous voyons si fréquemment en chimie se succéder facilement les unes aux autres par l'effet de la plus légère variation de température.

M. Grove a fait encore une observation importante, c'est que lorsqu'on fait les expériences qu'il a décrites, dans certaines vapeurs telles que celles de phosphore et d'autres, on voit la lumière électrique sillonnée de bandes obscures transversales; il faut avoir soin seulement de placer l'aiguille à 25 millimètres environ de la plaque. Ce phénomène est tout à fait identique à celui qu'a étudié M. Quet, et dont nous avons parlé dans le

[1] Tome II, page 231.

chapitre précédent [1]. Jusqu'à quel point est-il lié à un effet chimique exercé sur l'atmosphère de vapeurs par la décharge, soit indirectement par la chaleur, soit directement par l'électrolyse? c'est ce qu'il est impossible de dire dans l'état actuel de la science. Ce qu'il y a d'assez remarquable, c'est cette coïncidence entre la formation des anneaux alternativement brillants et obscurs sur la surface des électrodes, et l'apparition dans l'atmosphère de vapeurs, de bandes également alternativement lumineuses et obscures; ce qui semblerait indiquer dans les deux cas également une espèce d'effet d'interférence, et par conséquent une liaison entre les deux sortes d'apparence.

Nous ne terminerons pas ce paragraphe sans dire quelques mots d'un phénomène mixte qui tient à la fois aux effets chimiques et calorifiques de l'électricité dynamique; il s'agit de l'incandescence des fils métalliques qui servent d'électrodes dans les liquides ou dans les fluides élastiques. Hare l'avait observé d'une manière très-frappante en plongeant dans une solution de chlorure de calcium un fil de fer comme électrode négatif, et un fil de platine plus fin comme électrode positif; le second fondait en globules; en changeant les fils de place, le phénomène n'avait pas lieu. Mackrell avait obtenu des effets du même genre avec des fils de différente nature plongés dans l'acide sulfurique étendu. Il avait réussi à faire rougir dans le liquide des fils de fer et de cuivre sur une longueur de 4 à 5 centimètres; l'effet dépendait de la position du fil au pôle positif ou au négatif, et du fait que l'un des deux était immergé le premier ou le second. Quand les deux électrodes étaient formés de lames de platine, l'électrode positif se réchauffait beaucoup et présentait de temps à autre, sur sa tranche, une lumière bleuâtre; lorsque l'électrode négatif était mis le dernier en contact avec le liquide, il ne donnait aucune lumière, mais faisait entendre de petites explosions.

Grove a fait sur ce sujet quelques expériences intéressantes avec une énorme batterie de 500 couples que M. Gassiott avait fait construire. Une lame de platine, formant l'électrode positif

[1] Tome II, page 216.

de la batterie, était plongée dans une capsule d'eau distillée dont on avait élevé la température. L'électrode négatif, formé d'un fil de platine, était rapproché de manière à toucher un instant la surface de l'eau, et retiré immédiatement à une distance d'environ 7 millimètres dès que la décharge avait lieu; l'extrémité du fil était mise en fusion, et le platine fondu y restait comme suspendu au milieu de l'air ambiant, en dégageant une lumière intense, lançant des étincelles dans des directions contraires à celle de l'eau, et il ne se détachait du fil que quand on le secouait. L'eau à l'état de vapeur était décomposée, car l'électrode positif dégageait des gaz, et l'action moléculaire exercée sur le platine négatif ressemblait tout à fait aux courants qu'on observe à la surface du mercure quand on le rend négatif dans un électrolyte. Toutefois, comme les gaz produits n'ont pas été recueillis, il est impossible de décider si la décomposition est une véritable électrolyse ou simplement un effet de la haute température du platine, ce qui paraît plus probable.

M. Quet, de son côté, a réussi au moyen d'une pile de 40 grands couples de Bunzen à obtenir sur les électrodes de platine une vive lumière, en décomposant l'eau, ou acidulée, ou tenant de la potasse en dissolution. Le fil de platine n'est pas incandescent, mais il est comme entouré d'une gaîne de lumière qui semble le séparer de l'eau voisine. Dans l'acide sulfurique étendu, la lumière de l'électrode négatif est violette et celle du positif est rouge; dans la solution de potasse, celle de l'électrode négatif a une belle teinte rose. Lorsque le phénomène lumineux se produit, la décomposition de l'eau, qui était très-vive, se ralentit beaucoup; elle se ranime dès que l'illumination cesse. L'électrode négatif est en général celui qui s'illumine le plus facilement. Avec une pile comparativement faible, on obtient, en approchant délicatement de la surface du liquide où plonge l'électrode positif, l'extrémité d'une tige de platine qui sert d'électrode négatif, une lumière violette autour de cette extrémité, avec un léger bruit de crépitation; il faut que la tige ne fasse que toucher le liquide, ou ne s'y enfonce que de 1 millimètre.

Dernièrement encore, M. Van der Willigen, en opérant avec

l'acide sulfurique étendu et concentré, ou avec des solutions de chlorure de sodium, de sulfate de potasse, etc., a remarqué l'influence que pouvait avoir, sur l'effet calorifique et lumineux que manifeste l'un des électrodes, le fait qu'il est plongé le premier ou le dernier; il a pu s'assurer que ces phénomènes très-complexes, dans lesquels les fils, tantôt deviennent incandescents, tantôt sont simplement entourés d'une auréole lumineuse, tiennent à ce qu'il arrive dans certains cas qu'ils ne sont pas en contact avec le liquide, à cause de leur température élevée qui donne au liquide ambiant l'état sphéroïdal. Dans d'autres cas, les produits de la décomposition éprouvent eux-mêmes une incandescence ou une combustion qui imprime à la lumière une teinte particulière. Enfin, la chaleur elle-même se combine avec l'action électrolysante pour décomposer le conducteur liquide, qui peut lui-même, aussi bien qu'un conducteur solide, former l'électrode d'un arc voltaïque. Du reste, tous ces effets auraient besoin d'être analysés avec encore plus de soin qu'on ne l'a fait, pour qu'on pût bien y distinguer la part d'influence qui appartient à l'action chimique du courant, de celle qu'y exerce la chaleur même que développe le courant, soit en produisant l'arc, soit en réchauffant les fils; il paraît bien probable qu'on n'y trouverait aucune particularité qui ne fût la conséquence facile à prévoir des phénomènes que nous avons décrits, soit dans ce chapitre, soit dans le précédent.

§ 7. Production et propriétés de l'ozone.

Avant de terminer l'étude des effets chimiques de l'électricité dynamique, il est nécessaire de consacrer quelques instants à l'examen de l'un des plus remarquables, je veux parler de l'odeur moitié sulfureuse, moitié phosphorique qui accompagne le dégagement d'électricité dans l'air par les machines électriques ordinaires, et qu'on retrouve à l'électrode positif quand on décompose de l'eau au moyen d'un fort courant électrique. C'est à M. Schœnbein qu'on doit d'avoir, par ses études approfondies sur ce point particulier qui avait échappé à l'attention des phy-

siciens, mis sur la voie qui les a conduits à découvrir la nature même de ce phénomène.

Priestley, Cavendish et Van-Marum avaient bien remarqué que les gaz éprouvaient des modifications considérables par suite du passage des étincelles électriques, et en particulier ils avaient signalé, comme nous l'avons dit, la formation de l'acide nitrique quand le gaz était un mélange d'oxygène et d'azote tel que le présente l'air atmosphérique. Van-Marum cependant, en faisant passer une succession d'étincelles électriques dans un tube plein d'oxygène de 14 centimètres de longueur, entre un conducteur métallique situé au haut du tube et un bain de mercure situé à la partie inférieure, avait remarqué que le gaz avait pris une odeur très-forte qu'il disait être celle de la *machine électrique*. De plus, en opérant avec un tube étroit et plus court, il remarqua que le mercure s'était fortement oxydé à sa surface et que le volume de l'oxygène avait diminué; mais on pouvait attribuer ces effets à la formation de l'acide nitrique, vu que rien ne prouvait que l'oxygène fût bien pur et ne contînt pas d'azote.

M. Schœnbein, soixante ans plus tard, ayant voulu se rendre compte de la cause de l'odeur qui accompagne la décomposition voltaïque de l'eau, observa que cette odeur ne se manifestait qu'à l'électrode positif et qu'autant que cet électrode n'était pas oxydable, c'est-à-dire qu'il était de platine ou d'or. Il constata que l'odeur existe encore quand on recueille les gaz mélangés et qu'elle peut se conserver aussi longtemps qu'on le veut quand l'oxygène ou le mélange d'oxygène et d'hydrogène qui le possèdent sont renfermés dans des flacons bien bouchés. Tous les électrolytes ne sont pas également propres à développer le principe odorant; l'eau distillée et les solutions des acides ou des sels oxygénés le dégagent facilement; mais il n'en est pas de même de l'acide nitrique concentré et des solutions de chlorures, de bromures, d'iodures, non plus que de celle du sulfate de protoxyde de fer. Il suffit, pour faire disparaître l'odeur, de jeter dans le flacon où est le gaz qui en est imprégné quelques pincées de poussière de charbon, de limaille de fer, de zinc, d'étain, de plomb ou d'arsenic, ainsi que du bismuth ou de l'an-

timoine en poudre ou même quelques gouttes de mercure. Le même effet est produit par de petites quantités de solutions aqueuses de chlorures de fer ou d'étain, de sulfate de protoxyde de fer ou de quelques gouttes d'acide nitreux. La simple élévation de température produit le même effet; aussi ne se développe-t-il point d'odeur quand on chauffe le liquide électrolyque, lors même, ainsi que je l'ai observé, que c'est le courant par lequel la décomposition s'opère qui le réchauffe. J'ai également remarqué que, quoiqu'il faille en général une forte pile pour que l'odeur qui accompagne l'électrolyse se manifeste, on peut l'obtenir avec un courant très-faible en ayant soin de prendre pour électrode positif, dans l'eau acidulée, un fil de platine inséré dans un tube de verre suivant la méthode de Wollaston (fig. 241, p. 352).

Une propriété importante du gaz imprégné de l'odeur, et qu'il ne possède plus dès qu'on lui a enlevé cette odeur, c'est la faculté qu'il a de polariser négativement des fils ou des lames de platine ou d'or qu'on y place, c'est-à-dire de leur imprimer la propriété de développer, en étant plongés dans de l'eau conductrice avec un fil ou une lame semblable, mais qui n'ont pas été en contact avec le principe odorant, un courant électrique dont ils sont l'élément négatif.

Schœnbein a observé qu'on pouvait donner la même propriété au platine et à l'or en recevant sur des lames bien propres de l'un ou de l'autre de ces deux métaux, l'électricité émanée de l'extrémité émoussée d'un fil métallique en communication avec le conducteur d'une machine électrique et placée à 2 ou 3 centimètres de distance des lames. Peu importe que ce soit l'une ou l'autre des électricités qui sorte du conducteur, l'effet est le même sur la lame; mais le phénomène ne se manifeste pas si, le métal étant en communication directe avec le conducteur, l'électricité sort de la lame au lieu d'être reçue par elle. Le platine et l'or perdent immédiatement leur polarité sous l'action de la chaleur, ou si on les plonge quelques instants dans une atmosphère d'hydrogène; seulement dans ce dernier cas ces métaux peuvent acquérir une polarité opposée, lorsqu'on les laisse trop longtemps dans l'hydrogène.

L'odeur accompagne toujours la polarisation des métaux; aussi ne remarque-t-on ni odeur, ni polarisation quand les pointes d'où sort l'électricité sont chauffées ou entourées d'une couche d'eau; il suffit même d'envelopper la pointe métallique d'un petit morceau de toile humectée d'eau distillée pour empêcher la production de l'odeur.

Ces premières observations établissent déjà une grande analogie entre le principe odorant dégagé dans l'électrolyse de l'eau et celui qui est produit par l'électricité des machines ordinaires; il paraît également probable qu'il est identique avec celui qui se manifeste dans les nuages et en particulier dans le voisinage d'un lieu que la foudre a frappé. Il est de plus évident qu'il est gazeux et qu'il est un produit de l'action de l'électricité sur le milieu ambiant qui ne peut être que l'oxygène, l'azote ou la vapeur d'eau; nous l'appellerons *ozone*, avec M. Schœnbein, sans rien préjuger pour le moment sur sa nature chimique, uniquement à cause de l'odeur particulière et très-prononcée qu'il possède.

Conduit par des analogies tirées de l'odeur, M. Schœnbein découvrit un moyen chimique de préparer l'ozone. Ce moyen consiste à placer un morceau de phosphore dans un vase rempli d'air ordinaire. Si la température est assez élevée pour que le phosphore devienne lumineux, l'air du flacon prend bientôt une odeur d'ozone très-distincte de celle du phosphore ou plutôt de l'acide phosphorique qui se dégage en commençant; cet air présente les mêmes phénomènes que s'il avait été soumis à l'action de l'électricité, savoir, que les lames de platine et d'or sont polarisées négativement, et qu'il perd ses propriétés quand on y agite de la limaille de fer ou d'un autre métal oxydable. Le phosphore, dans l'oxygène pur et bien sec où il ne devient pas lumineux, ne produit pas d'ozone; il faut pour cette production qu'il soit phosphorescent, et pour cela qu'il soit placé dans un mélange d'oxygène et d'azote et à une température qui ne soit pas trop basse.

Indépendamment de ces propriétés fondamentales, l'ozone, quelle que soit la manière dont on le prépare, en possède un grand nombre d'autres dont voici les principales. Il agit sur les

Digitized by Google

couleurs végétales comme le chlore, c'est-à-dire qu'il les détruit et blanchit les papiers colorés qu'on plonge dans le gaz qui en contient. Et cela a lieu également que l'ozone ait une origine chimique ou électrique, et que cette origine électrique provienne de l'électrolyse, de l'action de la machine électrique, ou de l'électricité atmosphérique. Il en est de même pour tous les effets chimiques de l'ozone, et en particulier pour l'un des plus remarquables, savoir, l'action qu'il exerce sur l'iodure de potassium qui l'absorbe en libérant l'iode, ce que rend sensible le changement de couleur. En effet, si on mélange de la colle d'amidon avec une petite quantité d'une solution d'iodure de potassium, et qu'on y plonge une bande de papier, on obtient un réactif de l'ozone qui surpasse de beaucoup en délicatesse le meilleur galvanomètre ou l'odorat le plus fin. Une quantité d'ozone trop faible pour polariser un métal d'une manière sensible ou pour être accusée par l'odorat, suffit encore pour bleuir d'une manière prononcée le papier réactif.

Nous ne pouvons suivre M. Schœnbein dans l'étude détaillée qu'il a faite des diverses réactions chimiques de l'ozone, soit sur des substances inorganiques, soit sur des composés organiques; nous pouvons seulement, sans entrer dans plus de détails, dire d'une manière générale que l'ozone se comporte toujours, et plus particulièrement à l'égard des gaz composés et des corps simples, absolument comme le chlore ou le brôme.

L'iodure de potassium permet de découvrir les plus faibles traces d'ozone dans l'air atmosphérique. Il n'y a qu'à suspendre en plein air de petites bandes de papier à filtrer humectées du mélange d'iodure et d'amidon, et le plus souvent au bout de quelques minutes on les voit bleuir, tandis qu'elles ne se colorent point dans des vases fermés hermétiquement et remplis d'air. On trouve également de l'ozone dans l'eau d'orage, car cette eau se conduit exactement comme de l'eau distillée dans laquelle on a dissout de l'ozone. Il faut seulement dans ces deux cas, pour dégager l'ozone, verser un peu d'acide sulfurique dans l'eau; aussitôt elle colore en bleu la colle d'iodure d'amidon; il paraîtrait que l'ozone forme avec l'eau pure un composé que détruit la présence de l'acide sulfurique. On peut

communiquer exactement toutes les propriétés de l'eau d'orage à de l'eau distillée placée dans une tasse et mise en communication avec le sol, pendant qu'on l'expose à l'action d'une aigrette électrique énergique et qui répand une forte odeur. Il faut que cette exposition dure au moins une demi-heure pour que l'eau soit suffisamment ozonée.

Sans nous arrêter aux différentes hypothèses qui ont été faites sur la nature de l'ozone, nous passerons immédiatement aux expériences de M. Marignac, qui ont les premières résolu la question d'une manière péremptoire. Ce savant chimiste a d'abord démontré que la présence de l'azote n'était point, comme l'avait d'abord cru M. Schœnbein, indispensable à la production de l'ozone. En effet, en décomposant de l'eau aiguisée d'acide sulfurique dans un appareil tenant exactement le vide, et où aucune trace d'air ne pouvait rentrer, l'odeur d'ozone était la même qu'au premier instant, après que l'expérience avait déjà marché pendant plusieurs jours et que le quart de l'eau avait été décomposé; il faut seulement avoir soin de maintenir à une basse température le flacon où la décomposition a lieu[1]. Du reste, M. Marignac a trouvé que la manière la plus commode d'obtenir l'ozone consiste à diriger un courant d'air, au moyen d'un gazomètre, au travers d'un tube long de 1 mètre et de 6 millimètres de diamètre, renfermant dans sa longueur une série de bâtons de phosphore. Il a constaté, au moyen de cet appareil, que ni l'oxygène ni l'azote purs ne produisent d'ozone, mais que l'oxygène mélangé non-seulement à l'azote, mais

[1] M. Soret a trouvé plus tard que la quantité d'ozone obtenue par l'électrolysation de l'eau acidulée augmentait dans une proportion très-forte avec l'abaissement de la température. Ainsi en entourant le voltamètre d'un mélange frigorifique de glace et de sel marin et encore mieux de chlorure de sodium, le gaz qui s'en échappait était tellement ozoné qu'il attaquait et perçait rapidement les tubes en caoutchouc qui réunissaient les tubes desséchants qu'il devait traverser. En dosant l'ozone au moyen d'une dissolution titrée d'acide arsénieux qui a, comme le chlore, la propriété de le transformer en acide arsénique, M. Soret a trouvé une proportion d'ozone s'élevant à près de 0,005 du volume d'oxygène, en refroidissant le voltamètre assez pour que la température fût encore de — 7° à la fin de l'expérience; cette même proportion était au plus de 0,003 quand le voltamètre n'était pas refroidi.

même à l'acide carbonique et à l'hydrogène, en développe. L'air atmosphérique parfaitement sec n'en dégage point; le phosphore se recouvre dans ce cas d'une croûte blanche, et ne devient point phosphorescent; or, sa phosphorescence est une condition nécessaire pour qu'il y ait production d'ozone.

M. Marignac, en soumettant l'ozone à différentes épreuves, remarque d'abord qu'il est détruit en passant à travers un tube chauffé à 300 ou 400 degrés, qu'il n'éprouve aucune altération de la part de l'eau, de l'acide sulfurique concentré, de l'ammoniaque et de l'eau de baryte; mais il est absorbé avec la plus grande facilité par l'iodure de potassium dissous; la liqueur jaunit; une portion de l'iode est mise en liberté et entraînée par le courant d'air; lorsque tout l'iodure est décomposé, l'odeur d'ozone apparaît, et la liqueur redevient incolore et ne renferme plus que de l'iodate de potasse mélangé avec un peu de carbonate. Les métaux absorbent également l'ozone; ainsi, en faisant passer de l'air ozoné à travers un petit tube de 10 à 12 centimètres de longueur rempli d'argent pur et poreux, on trouve que cet air perd complétement son odeur et ses propriétés, et que l'argent se transforme en une matière qui a tous les caractères de l'oxyde d'argent; mais la présence de l'humidité est indispensable; si l'air ozoné est complétement desséché par son passage à travers plusieurs tubes remplis de pierre ponce imprégnée d'acide sulfurique, il n'attaque ni l'argent ni le cuivre, ni même le zinc, et il ne perd plus son odeur.

Ces expériences, et d'autres encore, ne permettaient plus que de choisir entre deux hypothèses sur la nature de l'ozone : l'une que c'est un composé nouveau d'hydrogène et d'oxygène susceptible de se transformer avec grande facilité en oxygène et en eau, et capable de céder son oxygène à un grand nombre de corps; l'autre qu'il n'est qu'une modification particulière de l'oxygène par suite de laquelle ce gaz acquiert, avec une odeur particulière, la propriété de se combiner avec des corps sur lesquels il est sans action dans son état ordinaire. Cette dernière hypothèse est celle que nous fûmes conduits à admettre, M. Marignac et moi, à la suite d'expériences dans lesquelles nous essayâmes de soumettre à des décharges électriques divers gaz que nous fai-

sions successivement arriver dans un tube de verre de 15 centimètres de longueur et de 1c, 5 de diamètre, communiquant d'un côté avec les appareils destinés à produire le courant du gaz que nous voulions étudier, et de l'autre avec un flacon dans lequel on pouvait examiner les propriétés que ces gaz avaient acquises. Deux fils de platine pénétraient par les extrémités du tube de verre, et se terminaient dans son intérieur à 9 ou 12 millimètres l'un de l'autre. L'un de ces fils était mis en communication avec le sol, l'autre avec le conducteur de la machine ; il était indifférent que la charge se fît par une succession d'étincelles ou par un courant continu et invisible. On appréciait facilement la formation de l'ozone au moyen de son odeur et de son action sur le papier imprégné d'amidon mélangé d'iodure de potassium. Or, l'expérience faite avec de l'air ordinaire parfaitement desséché donna un développement d'ozone aussi grand que lorsque l'air était humide ; l'ozone se développa également avec la plus grande facilité dans l'oxygène parfaitement pur et sec, tel qu'on le retire du chlorate de potasse purifié et préalablement fondu. Il ne se formait point d'ozone dans l'acide carbonique pur, sec ou humide, mais il s'en produisait dès qu'on mélangeait à l'acide carbonique une très-petite quantité d'air ou d'oxygène.

M. Schœnbein, à la suite de nouvelles recherches, en est venu lui-même à adopter l'opinion à laquelle nous avions été conduits, M. Marignac et moi, que l'ozone n'est qu'une modification de l'oxygène qui exalte ses affinités chimiques ; il s'est fondé surtout pour renoncer à l'opinion que c'est un peroxyde d'hydrogène, sur le fait qu'une masse d'air ozoné, en traversant un tube chauffé à 300°, est désozoné sans produire d'eau. Il a aussi démontré que, traité par un alcali, l'air ozoné produit toujours un azotate à cause de la facilité que l'oxygène à l'état d'ozone possède à se combiner avec l'azote.

MM. Frémy et E. Becquerel ont également, à la suite de longues et rigoureuses recherches, achevé de démontrer que l'ozone est une modification allotropique de l'oxygène dû à l'électricité. Ils ont successivement employé, pour obtenir l'ozone, la décomposition de l'eau par les courants électriques,

l'action sur l'air ou sur l'oxygène des étincelles obtenues par la rupture d'un circuit voltaïque, de celles que produit un appareil d'induction, enfin de celles qu'on tire des machines électriques ordinaires. Le premier moyen produit trop peu d'ozone; les étincelles voltaïques sont accompagnées d'un dégagement de chaleur qui détruit l'ozone à mesure qu'il se produit; il en est de même, quoiqu'à un moindre degré, des étincelles d'induction; on a donc dû renoncer à ces moyens d'obtenir l'ozone pour recourir à l'action des étincelles des machines ordinaires. Les deux physiciens ont reconnu que l'oxygène, quelle que soit la source d'où il provienne, est susceptible d'être ozoné, et que celui qui, en traversant l'iodure de potassium, a été désozoné, peut de nouveau être ozoné. Mais le point le plus important parmi ceux qu'ils ont établis, est qu'une quantité donnée d'oxygène peut être entièrement convertie en ozone, et que si, dans les expériences antérieures, on n'avait jamais réussi à ozoner qu'une portion du gaz soumis à l'expérience, c'est que probablement l'étincelle électrique, par son action calorifique, détruisait en grande partie l'effet d'ozonification qu'elle avait produit sur l'oxygène. Pour éviter cet inconvénient, il fallait absorber l'ozone à mesure qu'il se formait; dans ce but, de l'oxygène pur a été introduit dans un tube eudiométrique placé lui-même sur une dissolution d'iodure de potassium : le gaz a été soumis à l'action des étincelles électriques passant entre les fils de platine logés au haut du tube; il y avait plusieurs tubes semblables dont les diamètres étaient de $2^{mm}5$, et la longueur de 120 millimètres; les étincelles avaient environ 15 millimètres de longueur. L'oxygène a été absorbé d'une manière régulière par l'action des étincelles électriques; après trois heures d'électrisation, le liquide était monté de 2 centimètres dans l'intérieur du tube; l'absorption était en général proportionnelle au temps de l'électrisation; en prolongeant l'expérience pendant un temps suffisamment long, on pouvait faire absorber l'oxygène complétement par l'iodure de potassium. Un résultat assez curieux a été obtenu en faisant passer la même quantité d'électricité dans deux tubes placés à la suite l'un de l'autre et semblables en tout point, sauf que, par la disposition des fils de

platine, les étincelles étaient de 25 millimètres de longueur dans l'un, et seulement de 4 à 5 dans l'autre; après trois heures d'électrisation, l'absorption d'oxygène a été double dans le premier de ce qu'elle a été dans le second, ce qui prouve que pour une même quantité d'électricité, qui traverse une même masse de gaz, une longue étincelle produit plus d'effet qu'une étincelle plus courte [1]. Une lame d'argent, introduite dans un tube eudiométrique placé sur l'eau et rempli d'oxygène pur, a absorbé comme l'iodure de potassium, mais plus lentement que lui, l'oxygène électrisé, et l'absorption a eu lieu jusqu'à la disparition complète de tout le gaz. Le mercure, sous l'influence de l'humidité, a produit le même effet et s'est également oxydé.

Parmi les expériences multipliées de MM. Frémy et E. Becquerel, nous citerons encore les suivantes dans lesquelles ayant introduit de l'oxygène pur dans des tubes effilés contenant, l'un de l'iodure de potassium humide, et l'autre une petite lame d'argent recouverte d'humidité, ils ont fait passer une série d'étincelles électriques dans l'intérieur de ces tubes après les avoir fermés à la lampe à leurs deux extrémités. Le premier des tubes contenant l'argent humide a été électrisé pendant quatre jours à raison de six heures par jour, c'est-à-dire, en tout pendant vingt-quatre heures; la lame s'est couverte d'oxyde d'argent, et en cassant ensuite l'une des extrémités du tube sous l'eau, on a constaté une absorption égale aux deux tiers du volume d'oxygène soumis à l'expérience. L'absorption a été totale dans le second tube contenant l'iodure de potassium; déjà, après dix-huit heures d'électrisation, l'étincelle qui avait beaucoup d'éclat était à peine visible, preuve que le vide était à peu près complet dans le tube; après vingt-quatre heures, le tube ayant été cassé à l'une de ses extrémités sous l'eau, celle-ci s'y est aussitôt précipitée et l'a totalement rempli.

Il paraît donc bien établi maintenant que l'électricité en agissant sur l'oxygène lui imprime des propriétés qu'il ne pos-

[1] Ne serait-il pas possible que ce résultat tînt à la fois à ce que la longue étincelle agit dans le même temps sur un plus grand nombre de particules, et à ce qu'elle développe d'un autre côté moins de chaleur que la courte?

sédait pas avant d'être électrisé, et qui se manifestent par une odeur particulière et par une exaltation dans son activité chimique. Il est assez probable que l'action du phosphore est aussi une action électrique provenant du dégagement d'électricité qui doit accompagner la combinaison d'une partie de l'oxygène avec ce corps, et qui se manifeste par sa phosphorescence.

Quant à la nature de l'action que l'électricité exerce sur l'oxygène pour l'ozoner, c'est encore un mystère; il ne serait pas impossible qu'elle consistât à isoler les uns des autres les atomes d'oxygène qui, dans l'état ordinaire, seraient groupés de manière à former des molécules composées d'un plus ou moins grand nombre de ces atomes. On concevrait qu'isolés ainsi, les atomes auraient une activité chimique plus grande que lorsqu'ils sont agglomérés. Ce serait l'*état naissant*. Cette propriété de l'oxygène de former des molécules composées d'atomes groupés ensemble, se concilierait assez bien avec la vertu magnétique que possède ce gaz et qu'il est seul à posséder [1]. Mais il est prématuré de se livrer à des hypothèses sur lesquelles l'expérience pourra seule prononcer, et dont nous serons appelés d'ailleurs à nous occuper encore plus tard.

Bornons-nous à signaler deux écueils dans lesquels sont tombés et risquent de tomber les physiciens qui s'occupent de l'ozone, l'un, c'est de croire y voir un composé nitreux, ce qui tient à la difficulté qu'il y a à exclure la présence de l'azote, laquelle suffit en effet pour déterminer la formation d'un composé semblable; l'autre, c'est de croire que l'ozone est un oxyde d'hydrogène à cause de l'eau que l'oxygène, quoique parfaitement desséché, peut encore déposer en étant désozoné. M. Baumert avait cru même pouvoir conclure de là une différence entre l'ozone obtenu par l'électrolysation de l'eau et celui qui provient de l'électrisation de l'oxygène par les étincelles, admettant que le dernier est bien une modification allotropique de l'oxygène, mais que le premier est un oxyde d'hydrogène. Cependant il est facile d'expliquer la présence d'une petite quantité d'humidité dans l'oxygène qui provient de l'électro-

[1] Tome I, pages 491 et suiv.

lysation de l'eau, par la faculté avec laquelle l'hydrogène peut se mélanger avec lui et par conséquent former de l'eau, surtout quand on songe qu'il ne s'agit que d'une production de 5 milligrammes d'eau dans des opérations qui ont duré sans interruption, l'une six, l'autre huit jours.

Nous ne nous étendrons pas sur les conséquences qui résultent de la production et des propriétés de l'ozone dans les décompositions électro-chimiques des substances dont l'oxygène est un des éléments. Nous n'en signalerons qu'une qui est peut-être la plus importante, savoir : la formation de l'eau oxygénée dans l'électrolyse de l'eau acidulée, et par conséquent l'inexactitude qui en résulte dans les indications des voltamètres chimiques. M. Meidinger a étudié les circonstances qui facilitent cette formation en facilitant celle de l'ozone; c'est d'abord le degré de concentration de l'eau acidulée; avec de l'acide sulfurique de la densité 1, 4, il obtient dans 6 minutes, 245 mesures d'hydrogène pour 87 d'oxygène, tandis qu'avec de l'acide de 1,07 seulement de densité, il obtient dans 19 minutes les proportions voulues de 244 hydrogène et 122 oxygène. C'est ensuite la forme de l'électrode positif; en prenant pour cet électrode un fil au lieu d'une lame de platine, il obtient 40 mesures seulement d'oxygène pour 253 d'hydrogène. C'est enfin la force du courant et l'abaissement de température, deux circonstances qui diminuent aussi notablement la proportion de l'oxygène par rapport à celle de l'hydrogène. Cette diminution plus ou moins considérable dans la quantité voulue d'oxygène est accompagnée d'une odeur d'ozone qui montre la production de ce corps; mais il est facile de constater, en examinant le liquide, que la plus grande partie de l'ozone dégagé, a été employée à former le bioxyde d'hydrogène qui se trouve à l'état de dissolution dans le liquide électrolytique. La présence de ce bioxyde rend ce liquide très-impropre à servir à des expériences voltamétriques, car il donne alors une proportion d'hydrogène moindre que celle que dégage un autre voltamètre chargé avec un liquide qui n'a pas servi et qu'on met dans le même circuit. Il faut donc changer le liquide du voltamètre quand il a servi un certain temps ou le faire bouillir avec

soin pour en chasser le bioxyde d'hydrogène. En général, si l'on veut que les indications du voltamètre soient exactes, c'est-à-dire que les gaz se dégagent bien dans les proportions rigoureuses, il faut, afin d'éviter la production de l'ozone, se servir d'une eau acidulée plutôt faible (1, 1 de densité), faire dégager l'hydrogène sur un fil, et l'oxygène sur une lame de platine qui ne soit pas trop petite.

Liste des principaux travaux relatifs aux sujets traités dans ce chapitre :

Nicholson et Carlisle. — Décomposition de l'eau. — *Bibl. Brit.* T. XV, p. 11.

Cruikshanks. — Décomposition des sels. — *Bibl. Brit.* T. XV, p. 23.

Davy. — Pouvoir chimique de l'électricité voltaïque, etc. — *Bibl. Brit.* — T. XXXIV, p. 397, p. 16; t. XXXVI, p. 391; t. XXXIX, p. 3; t. XLI, p. 33. — *Annales de ch.* T. LXII, p. 172, et t. LXVIII, p. 203; t. LXX, p. 189, et 225.

Gay-Lussac et Thénard. — Causes qui facilitent les décompositions électro-chimiques. Recherches physico-chimiques, 2 vol. in-8°, *Paris*, 1811, *Annales de ch.* T. LXXXVIV, et LXXIX.

Hizinger et Berzelius. — Transport dans les décompositions électro-chimiques. — *Annales de ch.* T. LI, p. 167.

Grotthus. — Théorie des décompositions électro-chimiques. — *Annales de ch.* T. LVIII, p. 54. — Influence de la densité sur les mélanges explosifs. — *Idem.* T. LXXXII, p. 34.

Faraday. — Conditions nécessaires pour l'électrolyse; loi électrolytique. — *Recherches expérimentales sur l'électricité du § 380, au 852.* — *Trans. phil.*, (1833 et 1834). — *Bibl. univ.* T. LV, p. 20, et p. 394; t. LVII, p. 305; t. LVIII, p. 263.

Daniell. — Mode de décomposition des solutions salines. — *Bibl. univ.* (*nouvelle série*, 1839). T. XXIV, p. 386. — *Arch. de l'électr.* T. I, p. 694, et t. IV, p. 259.

Matteucci. — Action chimique de l'électricité. Lois des décompositions des mélanges, des composés multiples, etc. — *Bibl. univ.* T. LVIII, p. 23. — *Bibl. univ.* (*nouvelle série*). T. XX, p. 159, et t. XXI, p. 153; t. XXIV, p. 352; t. XXVI, p. 380; t. XXVIII; p. 410 (années 1830-1840). — *Arch. de l'électr.* T. I, p. 340. — *Ann. de ch. et de phys.* T. XLV, p. 322; et t. LVIII, p. 75.

Becquerel père. — Décomposition des mélanges, mesures des affinités, etc. — *C. R. de l'Ac. des Sc.* T. X, p. 671. — *Traité d'électricité et de magnétisme.*

E. Becquerel. — Décomposition des composés multiples. — *Ann. de ch. et de phys.* (*nouvelle série*). T. XI, p. 162 et 257. — Décomposition de l'eau oxygénée. — *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences.* T. XVIII, p. 862. — Influence des gaz dissous sur l'électrolysation de l'eau. — *Arch. de l'électr.* T. I, p. 281.

Hittorff. — Décomposition des sulfures. — *Annales de chim. et de phys.* (*nouvelle série*). T. XXXIV, p. 124. — Transport inégal aux deux pôles. — *Ann. der physik.* T. LXXXIX (n° 6, de 1853).

Beetz. — Décomposition de l'iodure de mercure, du verre, etc. — *Ann. der physik.* T. XC, p. 492 (n° 7, de 1854).

Pouillet. — Puissance électro-chimique inégale des deux pôles. — *Comptes rendus de l'Ac. des sc. de Paris.* T. XX, p. 1544.

Almeida. — Explication des anomalies dans l'électrolyse. — *Comptes rendus de l'Ac. des Sc. de Paris.* T. XXXVIII, p. 682.

Buff. — Confirmation de la loi électrolytique de Faraday. — *Arch. des sc. phys.* T. XXII, p. 344, et t. XXV, p. 65.

Soret. — *Idem.* — *Arch. des sciences phys.* T. XXV, p. 175, et t. XXVII, p. 113. — Ozone. — T. XXV, p. 263.

De la Rive. — Résistance au passage d'un conducteur solide à un conducteur liquide et oxydation du platine. — *Annales de ch. et de phys.* T. XXXVII, p. 215. — *Arch. de l'électr.* — T. I, p. 175, et p. 333. — *Arch. des sciences phys.* T. I, p. 373.

Nobili. — Apparences électro-chimiques, etc. — *Bibl. univ.* T. XXIII, p. 312; t. XXXIV, p. 194; t. XXXV, p. 261; t. XXXVI, p. 3; t. XXXVII, p. 174, et t. LVI; p. 150. — *Ann. de ch. et de phys.* T. XXXIV, p. 286 et 419.

Poggendorff. — Résistance au passage. — *Arch. de l'électr.* T. I, p. 497.

Vorsellman de Heer. — *Idem.* — *Arch. de l'électr.* T. I, p. 539 et p. 581.

Lenz. — *Idem.* — *Arch. de l'électr.* T. I, p. 177. — *Ann. der physik.* T. XLVIII, p. 385.

Meidinger.—Formation de l'oxyde d'hydrogène dans l'électrolysation de l'eau. — *Arch. des sc. phys.* T. XXV, p. 170, — *Ann. der ch. und phar.* T. LXXXVIII, p. 57.

Despretz. — Vérification de la loi de Faraday dans l'électrolysation de l'eau. *Comptes rendus de l'Acad. des sc. de Paris*, du 22 mai, 1854. T. XXXVIII.

Schœnbein. — Influence des gaz dissous sur l'électrolyse de l'eau — *Arch. de l'électr.* T. II, p. 241. — Ozone. — *Bibl. univ.* (*nouvelle série*). T. XXV (1840), p. 342. — *Arch. de l'élect.* T. III, p. 295; t. IV, p. 333; t. V, p. 11, 333 et 556.

Herschell. — Mouvements du mercure par le courant électrique. — *Annales de ch. et de phys.* — T. XXVIII, p. 280.

Serullas. — Mouvements des alliages de potassium, etc. *Annales de ch. et de phys.* T. XXXIV, p. 192.

Porret. — Transport électro-chimique de l'eau. — *Ann. de ch. et de phys.* — T. II, p. 137.

Wiedemann. — Lois du transport des liquides à travers les diaphragmes. — *Ann. de ch. et de phys.* (*nouvelle série*). T. XXXVII, p. 242. — *Arch. des sc. phys.* T. XXIII, p. 184.

Graham. — Endosmose électrique. — *Arch. des sc. phys.* T. XXVII, p. 37.

Digitized by Google

Napier. — *Idem.* — *Arch. de l'électr.* T. v, p. 459. — *Arch. des sciences phys.* T. II, p. 345, et t. IV, p. 68.

Paetz et *Van-Troostwik.* — Décomposition de l'eau par l'étincelle électrique. — *Annales de ch.* T. v, p. 276.

Pearson. — *Idem.* — *Annales de ch.* T. XXVII, p. 161.

Van-Marum. — *Idem. Ann. de ch. et de phys.* T. XLI, p. 77.

Wollaston. — *Idem.* — *Annales de ch. et de phys.* T. XVI, p. 45.

Bonijol. — Décompositions opérées par l'électricité ordinaire. — *Bibl. univ.* T. XLV, p. 213.

Melly. — Décomposition chimique par l'étincelle voltaïque. — *Arch. de l'électricité.* T. I, p. 297.

Grove. — Décomposition de l'eau par la chaleur. — *Ann. de ch. et de phys.* — (*N. S.*) T. XXI, p. 129. — Polarité électro-chimique des gaz. — *Idem.* T. XXXVII, p. 876.

Masson. — Effets chimiques de l'électricité d'induction. — *Comptes rendus de l'Acad. des sc. de Paris.* T. XXXVI, p. 1130.

Quet. — *Idem.* — Incandescence des électrodes. — *Comptes rendus de l'Acad. des sc.* T. XXXVI, p. 1012.

Mackrell. — Incandescence des électrodes. — *Arch. de l'élect.* T. I, p. 1575.

Van-der-Willigen. — *Idem.* — *Arch. des sciences phys.* T. XXVII, p. 312.

Marignac. — Ozone. — *Arch. de l'électr.* T. v, p. 5.

Frémy et E. Becquerel. — *Idem.* — *Ann. de ch. et de phys.* (*nouvelle série*). T. XXXV, p. 62.

Baumert. — *Idem.* — *Arch. des sciences phys.* T. XXIV, p. 381.

Digitized by Google

CHAPITRE IV.

EFFETS PHYSIOLOGIQUES DE L'ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE.

§ 1. Nature des effets que l'électricité dynamique exerce sur les corps organisés.

Nous avons vu qu'une grenouille convenablement préparée éprouve une secousse quand elle est traversée par un courant électrique même très-faible. Déjà, avant cette expérience de Galvani, on savait que l'électricité exerce une action spéciale sur les corps organisés, aussi bien végétaux qu'animaux; on avait même employé l'électricité fournie par les machines électriques comme moyen curatif dans les cas de paralysie; mais c'est surtout depuis la découverte de la pile qu'on a pu étudier avec plus de précision l'action physiologique de l'électricité dynamique. Cette étude est très-difficile et délicate, comme tout ce qui touche à la physiologie, à cause de l'ignorance où nous sommes encore du mode d'action de la force vitale qui préside à tous les phénomènes de cet ordre. Il y a plus; l'électricité agit-elle directement? ou n'exerce-t-elle qu'une action indirecte, en déterminant des effets calorifiques et chimiques qui seraient eux-mêmes la cause des phénomènes observés? Et, en effet, en traversant des corps organisés, elle y produit nécessairement de la chaleur et des décompositions chimiques à des degrés, il est vrai, plus ou moins sensibles, mais cependant le plus souvent appréciables. Or, cette chaleur et ces décompositions peuvent elles-mêmes donner naissance à des effets qu'on pourrait attribuer par erreur à l'action directe de l'électricité. Ainsi, Davy ayant soumis à l'action d'une pile de 150 couples une feuille de laurier, en s'en servant pour réunir deux vases pleins d'eau pure, dans chacun desquels plongeait l'un des élec-

trodes, cette feuille prit la même apparence que si elle avait été exposée à une température de 250 à 300° cent.; elle devint brune et fut même grillée; la matière colorante verte, ainsi que de la résine, de l'alcali et de la chaux avaient été transportés dans le vase négatif, tandis que le positif renfermait un liquide clair ayant l'odeur de la fleur de pêcher, qui était de l'acide hydrocyanique. Une plante de menthe employée également comme conducteur, donnait, après une action prolongée, des résultats du même genre; mais si l'action ne dure pas trop longtemps, la plante peut reprendre son état ordinaire. Il est évident que le courant électrique agit sur les matières végétales et animales comme sur des électrolytes, et qu'il doit nécessairement amener au bout d'un certain temps la désorganisation du corps organisé, comme le ferait toute autre action calorifique ou chimique.

On peut expliquer de la même manière l'influence apparente de l'électricité sur la germination et sur la fermentation. Il résulte des nombreux essais qui ont été faits sur le premier point que l'électricité statique n'exerce aucune influence sur la germination, ainsi que Ingenhouz l'avait très-bien démontré, en faisant voir que les erreurs dans lesquelles on était tombé à cet égard tenaient à ce qu'on n'avait pas eu égard à des circonstances importantes, telles que la présence de l'eau, de la lumière, etc. Quant à l'influence de l'électricité dynamique, qui est réelle dans quelques cas, il est facile de prouver qu'elle provient d'une action indirecte, savoir celle qu'exercent les produits de la décomposition, et en particulier l'oxygène et les acides d'une part, l'hydrogène et les alcalis d'autre part, sur les graines placées à l'un ou l'autre pôle, soit dans de l'eau, soit dans la terre humide. Ainsi, tandis que l'oxygène facilite la germination vers l'électrode positif, il arrive aussi très-souvent que l'acide qui se rend également à cet électrode fait l'effet contraire en détruisant la graine, tandis qu'on la voit germer à l'électrode négatif où s'accumule une base alcaline; c'est ce qui résulte de nombreuses recherches sur ce sujet de M. Becquerel et de M. Matteucci. Mais il n'est pas impossible, comme nous le verrons dans la cinquième partie, que l'électricité, même déve-

loppée dans l'acte de la germination, joue un rôle, secondaire il est vrai, dans ce phénomène physiologique. Il en est de même de la fermentation que M. Gay-Lussac a réussi à déterminer dans du jus de raisin conservé à l'abri de l'air, en y plongeant deux fils de platine communiquant respectivement avec les pôles d'une forte pile; il est évident que l'oxygène dû à l'action électrolytique était la cause de la fermentation, puisqu'il suffit d'introduire une petite quantité de ce gaz pour déterminer la production du phénomène, qui ne peut pas commencer dans un milieu où il n'y a pas d'oxygène. Enfin la coagulation de l'albumine autour de l'électrode négatif, observée par M. Lassaigne, est également le résultat de la présence à cet électrode d'acides provenant de la décomposition de quelques sels.

Nous ne nous arrêterons donc pas davantage sur ces effets indirects du courant électrique, nous nous bornerons à deux remarques : la première, c'est que nous devons en tenir compte en nous occupant des effets directs, et quand, en particulier, nous arriverons à l'étude de l'électricité même produite par les actions soit physiologiques pures, soit chimico-physiologiques ; la seconde, c'est que l'influence chimique de l'électricité dynamique sur les produits organiques serait en elle-même un sujet d'étude très-intéressant à cause des caractères propres à ce genre de composés qui les font différer d'une manière si prononcée des composés inorganiques, en raison de la vie qui a présidé à leur formation. Malheureusement jusqu'ici le nombre des recherches faites sur ce point particulier qui est plus du ressort de la chimie organique que de l'électricité, est très-limité; nous essayerons de faire connaître le petit nombre de résultats qui ont été obtenus quand nous nous occuperons des applications électro-chimiques.

Passons donc maintenant aux phénomènes mêmes auxquels donne naissance l'action directe de l'électricité dynamique sur les corps organisés. Les végétaux, quoique beaucoup moins excitables que les animaux, le sont cependant dans certaines limites. Ainsi, soit la *mimosa sensitiva*, soit la *mimosa pudica*, présentent des mouvements quand on fait passer le courant électrique à travers leurs branches et leurs feuilles au moyen

de petites lames de plomb ou d'étain dont on les recouvre en quelques parties de leur surface. La simple communication des armatures entre elles sans l'intermédiaire de la pile ne suffit point; mais, avec le passage de l'électricité, on voit dans la *mimosa pudica* en particulier, une minute après l'établissement du courant, les feuilles, surtout celles qui sont armées, se plier sur leurs branches, puis le même effet se produire successivement sur d'autres feuilles çà et là dans plusieurs parties de la plante. Giulio, à qui nous devons ces expériences, a trouvé que dans la *mimosa asperata* où l'irritabilité naturelle est moins prononcée, l'irritabilité produite par l'électricité sur ses nœuds, ses feuilles et ses pétioles, est beaucoup moindre que sur les deux autres espèces de *mimosa*. L'*hedysarum gyrans* et d'autres plantes remarquables par les mouvements que présentent leurs folioles, n'éprouvent aucune influence de la part de l'électricité dynamique.

On voit donc que l'action physiologique de cet agent sur le règne végétal est très-peu importante ou que du moins nos connaissances à cet égard sont très-limitées. Cependant il existe encore une plante sur laquelle on a observé des effets d'électricité très-remarquables, c'est le *chara* qui, comme on le sait, présente un phénomène physiologique très-curieux, savoir, un mouvement circulaire de globules et de lymphe: ces globules, dirigés de bas en haut, redescendent dès l'instant qu'ils rencontrent un nœud qui s'oppose à leur mouvement pour remonter et ainsi de suite; en enlevant le diaphragme qui forme le nœud, les globules sortent par l'ouverture et se disséminent dans l'eau. MM. Dutrochet et Becquerel, en faisant passer dans une tige de chara un courant électrique plus ou moins fort tantôt de haut en bas, tantôt de bas en haut, ont remarqué que cette transmission produit dans les premiers instants un engourdissement dans le mouvement des globules dont l'intensité dépend de la force du courant et qui est indépendant de sa direction, mais qui est le même sur les mouvements ascendants et descendants. Quand le mouvement de la lymphe a été arrêté, il recommence peu à peu sans que le courant cesse de passer et il reprend la vitesse qu'il avait primiti-

vement ; la durée de l'arrêt dépend de l'intensité du courant, elle peut aller jusqu'à quelques heures si cette intensité est suffisamment forte ; mais le passage de l'électricité ne produit aucune désorganisation dans la plante, puisqu'un repos plus ou moins long lui rend ses facultés naturelles. L'élévation de température produit sur le chara des effets analogues à ceux du passage du courant. A partir de 0°, la circulation du chara s'accélère à mesure que la température monte ; à 18° ou 19° elle est très-rapide ; elle diminue jusqu'à 27° où elle est très-ralentie, puis elle augmente de nouveau jusqu'à 45° où elle cesse entièrement et ne peut recommencer, la plante éprouvant à cette température une désorganisation qui détruit le mouvement rotatoire des globules. On pourrait donc croire que c'est à la chaleur qu'il développe en traversant le chara que le courant doit son effet, mais il ne produit jamais d'accélération comme en détermine l'augmentation de la température, et d'un autre côté, la chaleur ne produit pas d'arrêt comme cela a lieu avec l'électricité transmise. Il paraît donc plus probable que l'influence du courant sur la circulation du chara provient de la disposition nouvelle qu'il oblige les molécules du végétal d'affecter en les polarisant; polarisation qui, lorsqu'elle est suivie d'une décomposition très-forte, peut désorganiser le végétal, mais contre laquelle luttent cependant avec assez d'avantage les forces vitales qui produisent la circulation, pour que les molécules organiques dérangées de leur position naturelle d'équilibre puissent recouvrer leurs propriétés primitives. L'action qui détermine le mouvement rotatoire l'emportant sur celle du courant, celui-ci continue à passer sans troubler le mouvement; mais la lutte cesse quand le courant possède une intensité suffisante; d'un autre côté, les forces vitales, après avoir fait des efforts qui les épuisent momentanément, reprennent leurs facultés après un certain temps de repos, une fois qu'elles ne sont plus soumises à l'action de l'électricité. On voit donc qu'il y a des différences assez notables entre la chaleur et le courant quant à la manière dont leur action s'exerce; ce qui permet de conclure que l'électricité agit dans cet ordre de phénomènes d'une manière qui lui est propre.

Mais c'est surtout sur les animaux que l'action directe de l'électricité a été constatée et étudiée. La manière la plus frappante de le démontrer est de préparer une grenouille à la façon de Galvani (fig. 258), en la coupant au milieu du corps, puis, après l'avoir dépouillée rapidement, on passe la pointe des ciseaux sous les deux nerfs lombaires qui paraissent comme

Fig. 258.

des fils blancs de chaque côté de la colonne vertébrale; on enlève les deux ou trois vertèbres inférieures, on met ainsi à nu les nerfs lombaires; ils forment alors la seule attache qui lie encore les membres inférieurs aux vertèbres supérieures. Si maintenant on suspend la grenouille à un fil conducteur isolé au moyen de ses nerfs, et qu'on fasse passer en touchant les membres inférieurs avec un autre conducteur, une légère décharge ou un faible courant électrique des nerfs aux muscles, on voit les membres de la grenouille éprouver une contraction subite extrêmement vive. On peut également faire l'expérience en plaçant les jambes de la grenouille chacune dans un verre distinct plein d'eau (fig. 259), et en plongeant dans l'un des verres le zinc et dans l'autre le cuivre d'un petit couple; aussitôt la grenouille éprouve une contraction assez forte pour que le plus souvent elle soit chassée d'un verre dans l'autre ou même des deux verres également. Il n'est pas nécessaire, pour obtenir la contraction, de mettre dans le circuit les nerfs et les mus-

cles ; il suffit de faire passer le courant dans une partie des nerfs, même très-courte, pour que les muscles se contractent. Au reste, toute action existante exercée sur le nerf produit un effet du même genre.

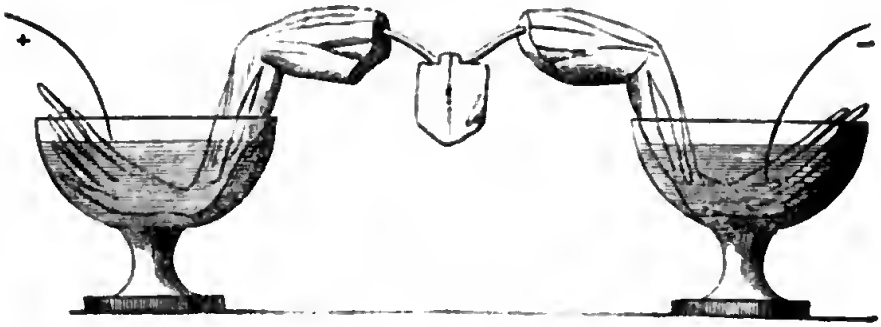


Fig. 256.

Mais ce n'est pas sur la grenouille seule que l'on a étudié l'action physiologique du courant. Galvani lui-même et Aldini produisirent, il y a près de soixante ans, des contractions sur la tête d'un bœuf récemment assommé en introduisant dans une de ses oreilles un fil de métal en communication avec l'un des pôles de la pile et dans les naseaux un fil en communication avec l'autre pôle. On vit aussitôt les yeux s'ouvrir, les oreilles se secouer, la langue s'agiter et les naseaux s'en fler; des résultats semblables furent obtenus sur divers animaux. Plus tard, en 1818, le docteur Ure en ayant essayé de soumettre le corps d'un pendu, immédiatement après l'exécution, à l'action du courant d'une pile de 270 couples cuivre et zinc de 16 pouces carrés de surface et chargée avec de l'eau légèrement acidulée avec de l'acide sulfurique et nitrique, obtint des résultats remarquables. Un des électrodes de la pile fut, au moyen d'une incision, mis en contact avec la moelle épinière, tandis que l'autre fut appliqué sur le nerf sciatique qu'on avait également mis à nu ; à l'instant tous les membres du corps furent agités de mouvements convulsifs ; en faisant mouvoir le second conducteur de la banche au talon, le genou ayant été plié préalablement, la jambe fut lancée avec tant de violence qu'elle faillit renverser un des assistants qui essayait

en vain d'en prévenir l'extension. D'autres expériences faites sur différentes parties du corps produisirent des contractions plus ou moins fortes dans divers organes et en particulier dans le diaphragme, auquel on parvint à donner un mouvement momentané analogue à celui qu'il possède pendant la vie, en déterminant ainsi une espèce de respiration forte mais pénible.

Humboldt qui, dès l'origine de la découverte de Galvani, s'était occupé de ce sujet avec beaucoup de soin, avait, après diverses recherches faites sur les animaux et sur lesquelles nous reviendrons, voulu étudier l'action physiologique de l'électricité sur lui-même. S'étant appliqué des vésicatoires sur chacun des muscles deltoïdes, il mit sur l'une de ses plaies une plaque d'argent et sur l'autre une plaque de zinc, et réunissant les deux plaques par un fil de métal, il constitua un couple dont le courant contractait alternativement les muscles de l'épaule et du cou avec une sensation de forte cuisson aussitôt que la vessie, formée par le vésicatoire, fut ouverte.

Pour éprouver l'effet du courant sur son propre corps, il suffit de plonger chacune des mains dans un vase plein d'eau salée communiquant, l'un avec le pôle positif, l'autre avec le pôle négatif d'une pile d'une trentaine de couples faiblement chargés; on éprouve aussitôt une commotion qui s'étend jusqu'au poignet ou au coude, selon l'intensité de la décharge. Quand le courant passe pendant quelque temps, et qu'on tient dans chacune de ses mains un cylindre de métal mouillé assez gros pour la remplir entièrement, on éprouve une sensation désagréable analogue à un frémissement. Si plusieurs personnes se donnent la main, la commotion est éprouvée à la fois par toutes d'une manière sensible, surtout si le nombre des personnes est peu considérable. Le corps humain n'est pas, en effet, un bien bon conducteur. C'est ce que constatent des expériences assez exactes faites par Lenz avec un galvanomètre multiplicateur de Nobili, au moyen du courant d'induction d'une machine de Clarke, et dont voici les détails.

On détermine d'abord la résistance du circuit entier, composé du fil induit, du fil du multiplicateur et des fils qui servent à mettre le multiplicateur dans le circuit, et on la prend pour

unité; puis on interpose dans le circuit une personne, en lui faisant plonger un ou plusieurs doigts de chaque main dans deux vases remplis d'un liquide conducteur, qui sont mis eux-mêmes en communication avec les extrémités du fil induit. On mesure alternativement la force du courant avec et sans l'interposition du corps humain, et on a ainsi une moyenne assez exacte de l'effet de résistance produit par cette interposition. Ainsi, en se servant pour liquide conducteur de l'eau aiguisée de $\frac{1}{100}$ d'acide sulfurique, on trouve que la résistance produite par le corps d'un homme de quarante-trois ans est trente-quatre fois la résistance prise pour unité, quand il ne plonge qu'un doigt dans chaque vase, et seulement 6 fois quand il plonge la main entière. La résistance est d'autant plus faible que le liquide est plus acide, et par conséquent plus conducteur; on voit donc par là que la résistance existe surtout dans le passage du courant du liquide dans le corps, et réciproquement, et que la cause en est par conséquent dans l'épiderme. En effet, la main immergée ayant reçu accidentellement dans une expérience une petite écorchure, la résistance tomba de 6,06 à 4,81, quoique les circonstances fussent d'ailleurs parfaitement les mêmes [1]. Le mercure, substitué à l'eau acidulée, augmente la résistance au lieu de la diminuer, probablement parce qu'il n'humecte pas la peau comme la solution acide.

La résistance varie un peu avec les personnes soumises à l'expérience; elle est en général beaucoup plus considérable avec des enfants ou des jeunes gens qu'avec des gens plus âgés. Il est probable que cela tient à des différences dans la surface des doigts immergés, puisque les résistances diffèrent moins quand c'est la main tout entière qui est plongée que lorsque ce n'est qu'un doigt ou deux. Il semblerait aussi que la main droite présente plus de résistance que la main gauche, ce qui peut tenir au plus grand usage qu'on en fait.

[1] Il n'est personne qui, ayant manié quelquefois des piles voltaïques, ne sache combien la plus petite écorchure à une partie de la main, quand elle se trouve en contact avec l'un des électrodes, facilite la production de la sensation désagréable provenant du passage du courant dans les membres.

Pour comparer les résultats nombreux qu'il a obtenus à une résistance connue, Lenz a cherché à rapporter par les procédés décrits [1] la résistance de son circuit, non compris le corps humain interposé, à celle d'un fil de cuivre de 1 millimètre d'épaisseur, et il a trouvé qu'elle équivalait à une longueur de ce fil de 13357^{m}, 5, ce qui fait que la moyenne des résistances présentées par les diverses personnes, mises en expérience au nombre de six, équivaut à 91503 mètres. M. Pouillet avait trouvé cette résistance égale à celle d'un fil de cuivre, toujours de 1 millimètre de diamètre, mais de 11 lieues de longueur, ce qui fait une résistance environ moitié moindre; il est vrai que les mains étaient mouillées et plongées dans le mercure où aboutissaient les fils conducteurs du courant, ce qui explique pourquoi la résistance était moins considérable; mais le même physicien a observé que si le courant passe d'un doigt à l'autre de la même main, les doigts étant mouillés et plongés dans le mercure jusqu'à la moitié ou au tiers de la première phalange, il est affaibli 7 fois plus, c'est-à-dire autant que s'il avait traversé 77 lieues du fil de cuivre. M. Pouillet se servait, dans ces expériences, d'une pile de 12 couples à la Wollaston et d'un multiplicateur de 240 tours muni d'une aiguille aimantée très-sensible.

Plus tard, M. Masson a étudié l'effet physiologique des courants discontinus; il se servait d'une roue dentée pour rendre discontinus les courants qui traversaient une longue hélice, dans l'intérieur de laquelle on introduisait un cylindre de fer doux pour les rendre plus intenses. Il a remarqué qu'en mettant un certain intervalle entre chaque secousse, on éprouve des commotions difficiles à supporter; en augmentant la vitesse de la roue, il arrive un instant où les muscles éprouvant une contraction involontaire, on ne peut plus abandonner les poignées qu'on tient entre les mains pour transmettre le courant à travers le corps; la douleur devient insupportable, les bras se tordent sur eux-mêmes; et, en augmentant l'intensité de la pile, la douleur devient telle qu'on s'évanouirait si on ne

[1] Tome II, p. 29.

cessait pas aussitôt l'expérience. En tournant plus rapidement, la douleur diminue, les contractions sont moins fortes, ce n'est plus qu'un engourdissement qui finit lui-même par disparaître pour une certaine vitesse. Cette limite n'est pas la même pour tous les individus, elle varie également avec l'intensité du courant. M. Masson, en appliquant une succession plus ou moins rapide de ces secousses électriques à des chats très-vigoureux, a déterminé assez promptement leur mort, laquelle était accompagnée d'une raideur des membres semblable à celle qu'aurait manifestée l'animal quinze jours après une mort naturelle.

Nous reviendrons sur les effets observés par M. Masson, et en particulier sur une propriété qu'il a trouvé appartenir au courant induit, celle de n'affecter que les points du corps touchés par les électrodes, quand nous nous occuperons des applications de l'électricité comme moyen curatif. Nous renvoyons également à cette partie de notre ouvrage bien des détails importants sur l'action spécifique de l'électricité dynamique sur les systèmes nerveux et musculaire, ainsi que la description des divers appareils, imaginés pour la production des courants destinés aux applications physiologiques, tels que la roue foudroyante de Neeff, dont ils ne sont que des modifications. Nous ne nous arrêtons pas non plus à décrire ici les nombreuses recherches de divers physiologistes sur la spécialité de l'action électrique au point de vue des fonctions physiologiques, parce que les résultats en ont été contestés, et que d'ailleurs ce n'est que lorsque ayant achevé l'étude théorique de l'électricité et en particulier de l'électricité animale, nous pourrons discerner en quoi cette spécialité peut consister. Nous nous bornerons à rappeler que Ritter avait cru que l'électricité du pôle positif augmente les forces vitales, tandis que celle du négatif les diminue; que le premier tuméfie les parties du corps qu'il touche et fortifie le pouls de la main, tandis que le second l'affaiblit; il avait également cru voir une influence différente des deux pôles sur la vision et sur les sens du goût et de l'odorat; tous ces effets et bien d'autres encore étaient évidemment dus à l'action soit chimique, soit calorifique de l'électricité dynamique et non à une action statique de l'élec-

tricité de chaque pôle. Wassali, Julio, Rossi et Fowler, à la suite d'un grand nombre d'expériences sur les corps des criminels après leur exécution, avaient cru trouver une action spécifique de l'électricité sur le cœur et sur d'autres muscles, tels que ceux de l'estomac et des intestins; Volta et Aldini avaient constamment nié l'existence de ce genre d'action. Enfin, le docteur Wilson Philipp, en opérant sur des lapins la section des nerfs de la huitième paire, avait estimé pouvoir remplacer par un courant électrique l'action de ces nerfs sur la digestion. D'autres avaient été encore plus loin, en avançant que l'influence nerveuse n'est qu'une action analogue à celle de l'électricité. On avait même tenté de remplacer cette influence dans les secrétions par un courant électrique agissant directement sur les organes secréteurs. Mais tous ces résultats n'avaient qu'une fausse ressemblance avec ceux que détermine la force vitale transmise par l'intermédiaire des nerfs, ainsi que l'a prouvé un examen plus approfondi et plus détaillé. Nous laisserons donc de côté toutes ces recherches pour étudier d'une manière plus précise et plus scientifique, avec les divers physiciens qui s'en sont occupés, l'action réelle du courant électrique sur les différentes parties du corps des animaux, de la grenouille en particulier, en nous bornant à constater les faits positifs que des expériences multipliées ont mis hors de toute espèce de doute. Cependant cette étude elle-même ne pourra être complète que lorsque, abordant dans notre cinquième partie l'action physiologique considérée comme source de l'électricité, nous pourrons apprécier la part d'influence qu'exerce, dans les phénomènes que détermine l'application d'une électricité extérieure et artificielle, l'électricité naturelle que l'animal possède et qui est liée avec ses fonctions physiologiques.

§ 2. Analyse fondamentale de l'action du courant électrique sur les animaux.

L'action du courant électrique sur les animaux ne se manifeste nettement que sous deux formes : la douleur dont la perception ne peut être nettement accusée que par l'homme; la

contraction musculaire qui est sensible chez tous les animaux par les mouvements qui en sont la conséquence, et qui peut même se manifester plus ou moins longtemps après qu'ils ont cessé de vivre. Elle consiste dans un raccourcissement des fibres dont se compose le muscle accompagné d'un accroissement de leur diamètre, sans qu'il en résulte aucun changement dans le volume du muscle lui-même. C'est ce que Matteucci a démontré, en plaçant une torpille et une grenouille, préparée à la manière de Galvani, dans un vase rempli d'eau et fermé avec un bouchon traversé par un tube étroit dans lequel le liquide monte; on fait arriver un courant électrique dans le vase au moyen de deux fils isolés, et, quoique la torpille et la grenouille éprouvent de fortes contractions, on ne voit pas que le niveau de la colonne liquide dans le tube éprouve le moindre changement.

Nous ne nous arrêterons pas ici aux détails relatifs à la structure du muscle et aux hypothèses qu'on a faites sur la manière dont s'opère sa contraction; nous nous bornerons à ajouter que la cause qui la détermine dans l'animal à l'état normal est l'influence transmise par les nerfs qu'on désigne sous le nom de force nerveuse[1]. L'ensemble de ces nerfs constitue le système nerveux célébro-spinal, qui se compose principalement d'un nombre infini de ramifications disséminées dans le corps de l'animal, se réunissant en une masse centrale qui forme le cerveau et la moelle épinière[2]. Si l'on coupe une de ces ramifications sur un animal vivant, et si l'on touche avec un fer rouge ou avec un morceau de potasse, ou si l'on blesse ou tiraille d'une manière quelconque la portion du nerf qui est restée en communication avec l'axe cérébro-spinal, l'animal donne des signes

[1] Nous excluons à dessein le mot *fluide nerveux* qui est quelquefois employé, parce qu'il repose sur une hypothèse que rien ne justifie, quant à la nature de la force nerveuse.

[2] Outre le système nerveux cérébro-spinal, il en existe un second, le système nerveux ganglionnaire, composé de ramifications distribuées principalement aux appareils de la vie organique, qui, malgré ses liaisons nombreuses avec le premier, ne réveille cependant, quand il est irrité, ni mouvements ni sensations. Nous ne nous en occuperons pas dans les recherches qui font l'objet de ce paragraphe.

de douleur. En produisant ces mêmes irritations au-dessous de la section, les signes de la douleur ne se manifestent pas, et on aperçoit seulement les contractions dans les muscles où se ramifie le nerf irrité. Quand on pratique ces excitations sur le nerf intact, on détermine simultanément la douleur et la contraction. On peut au lieu de couper le nerf, le lier, ce qui produit le même effet que la section; mais si on le lie en deux points et qu'on l'irrite dans la portion comprise entre les deux ligatures, on n'a ni douleur ni excitation. Le nerf a donc pour office de transmettre l'action du stimulant appliqué sur lui, soit au cerveau où elle produit une sensation, soit aux muscles où elle détermine une contraction. Les découvertes modernes des physiologistes ont démontré que parmi les nerfs il en est un certain nombre qui, étant excités, ne provoquent les uns que la contractibilité musculaire, les autres que la douleur. Ajoutons qu'un faisceau nerveux est composé d'un grand nombre de filaments tous capables de transmettre séparément l'action qui les excite, sans que les filaments avec lesquels est en contact celui qui est excité y prennent part. Quant à la nature même des nerfs, nous nous bornerons à remarquer que c'est une matière graisseuse renfermée dans de petits canaux cylindriques d'une consistance plus ferme et qu'on nomme névrilèmes, sans entrer pour le moment dans plus de détails sur leur constitution physique et chimique, qui a été l'objet des recherches d'un grand nombre de physiologistes.

Les causes capables de développer dans les nerfs la force nerveuse, qui en se propageant jusqu'aux muscles y détermine la contraction, sont avant tout la volonté, puis les actions mécaniques, les actions chimiques, la chaleur, et enfin l'électricité; mais l'électricité diffère, dans son mode d'action, des autres agents extérieurs par des caractères qui lui sont propres et qui lui ont donné à cet égard une importance relative beaucoup plus grande, en rapprochant son effet de celui de l'agent que la volonté met en activité. Voici ses principaux caractères dont nous allons établir l'existence : le courant électrique est le seul irritant qui puisse exciter tantôt la contraction, tantôt la sensation, suivant la direction dans laquelle il parcourt un

nerf; le courant électrique ne produit aucun des phénomènes qui résultent de l'excitabilité du nerf quand il le traverse perpendiculairement à sa longueur; il ne détermine ni contraction, ni sensation quand son action sur le nerf est prolongée; il peut seul modifier l'excitabilité du nerf, même la détruire, s'il circule dans un certain sens, et la conserver, ou même l'augmenter, s'il est dirigé en sens inverse; enfin, seul entre les agents irritants, il peut réveiller pendant longtemps l'excitabilité des nerfs lorsqu'elle est très-affaiblie par rapport aux autres stimulants.

Nous avons déjà rappelé dans le paragraphe précédent l'expérience fondamentale de Galvani et sa manière de préparer la grenouille. Volta et Fowler avaient remarqué, en répétant et variant cette expérience, que les mêmes contractions que la grenouille éprouve au moment où le courant s'établit, se renouvellent à l'instant où ce courant cesse de la traverser. Ce fait, étudié successivement par Valli, Rumford et Pfaff, avait été attribué par Volta à une espèce de refoulement qu'éprouve le courant au moment de la rupture du circuit par l'obstacle instantané qu'il rencontre, comme le ferait un fluide qui, cheminant dans un canal, reculerait et se mouvrait dans un sens opposé quand il serait brusquement arrêté. Marianini, qui a étudié avec soin ce phénomène, n'a pas réussi à constater l'existence du contre-courant hypothétique de Volta, en employant soit un galvanomètre, soit la sensation excrcée par le courant sur la langue; il a donc pensé qu'en enlevant les communications qui transmettent le courant d'une pile, on ne fait naître aucun courant opposé. C'est donc au seul fait qu'elle cesse d'être traversée par le courant, que la grenouille doit la seconde contraction qu'elle éprouve, et la preuve, c'est qu'il suffit pour la produire de réunir par un arc métallique les deux conducteurs qui font communiquer les pôles de la pile avec la grenouille. On détermine sa contraction en dérivant ainsi par un meilleur conducteur, le courant qui continue à cheminer dans un circuit dont l'animal, il est vrai, ne fait plus partie. Toutefois, Marianini a montré que la contraction qui a lieu au moment de l'irruption du courant et celle qui a

lieu au moment de sa cessation, n'ont pas la même intensité, du moins lorsque la grenouille a perdu de son excitabilité; c'est l'une ou l'autre qui est la plus forte, suivant le sens dans

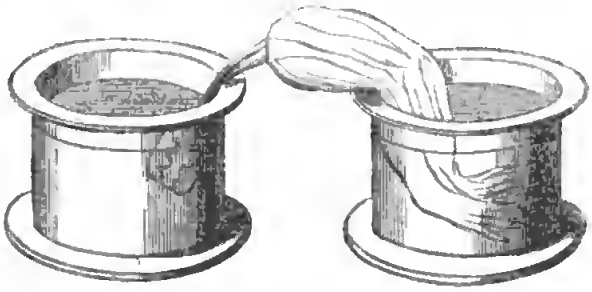


Fig. 260.

lequel chemine le courant, par rapport aux ramifications nerveuses. Pour bien apprécier cette différence, il faut préparer une grenouille de manière que les cuisses ne tiennent au tronc que par les nerfs lombaires (fig. 260); on place le tronc dans une tasse remplie d'eau qui communique avec l'un des pôles, et les deux cuisses dans une autre tasse en communicatiou avec l'autre pôle. Si le pôle positif est dans la tasse où est le tronc et le négatif dans celle où sont les cuisses, la grenouille se contracte toutes les fois qu'on ferme le circuit et non quand on l'ouvre; en changeant les pôles de place, les effets sont inverses. Ce résultat prouve que, pour que la contraction ait lieu quand on ferme le circuit, il faut que le courant chemine dans le sens de la ramification des nerfs, et que pour qu'elle ait lieu quand on l'ouvre, il faut que le courant chemine dans un sens contraire à cette ramification. Nous appellerons courant *direct* celui qui chemine dans le premier sens, et *inverse* celui qui chemine dans le second.

Ce même phénomène se manifeste quand on fait l'expérience avec une grenouille préparée comme ci-dessus, mais disposée de façon que l'une de ces cuisses plonge dans l'un des verres et l'autre dans l'autre verre (fig. 261). La grenouille, comme on le sait, s'élance au dehors des verres quand on plonge dans chacun l'un des pôles d'une pile; mais si on la retient forcément en place, on aperçoit d'abord des contractions dans les deux

jambes, aussi bien en ouvrant qu'en fermant le circuit. En continuant à agir, il arrive un moment où l'excitabilité de l'animal étant diminuée, un seul membre se contracte quand on

Fig. 261.

ferme le circuit; c'est celui dans lequel le courant est direct; et au contraire, quand on l'interrompt, la contraction a lieu dans l'autre membre, savoir, celui qui est parcouru par le courant inverse.

Ce fait important bien analysé et constaté par Marianini avait déjà été en partie aperçu par Volta, par Lehot et par Bellinghieri qui n'avaient pourtant point remarqué le point essentiel que M. Marianini a signalé le premier, c'est que dans le cas du courant inverse il y a contraction quand le courant est interrompu, lors même qu'il n'y en a point quand il est établi. Ajoutons qu'avec deux grenouilles mises dans le circuit à la suite l'une de l'autre de façon que leurs deux troncs plongent dans le même vase, les cuisses de l'une communiquant avec le pôle positif et celles de l'autre avec le négatif, on voit, à l'établissement du circuit, tressaillir celle qui est parcourue par le courant direct et non l'autre qui l'est par le courant inverse, tandis qu'à la rupture du circuit c'est la seconde qui tressaille et non la première.

M. Marianini a encore observé que, lorsque l'électricité agit immédiatement sur les muscles, il n'y a de contractions qu'à l'instant où le circuit est fermé, quelle que soit d'ailleurs la direction du courant, d'où il est amené à distinguer ces der-

nières qu'il nomme *idiopathiques*, de celles qui dérivent de l'action exercée par le courant électrique sur les nerfs qui président aux mouvements des mêmes muscles, et qu'il nomme *sympathiques*. Nous venons de voir qu'elles n'ont lieu qu'à l'établissement du circuit et non à sa rupture si le courant est direct et qu'à sa rupture et non à son établissement s'il est inverse. Mais dans les deux cas où il n'y a pas contraction ne se pourrait-il pas qu'il y eût sensation, du moins si l'animal est vivant? C'est ce que Marianini croit avoir constaté en opérant sur une grenouille dont les membres postérieurs n'étaient restés attachés au corps que par deux nerfs cruraux, et en mettant en communication ces membres unis ensemble avec l'un des pôles, pendant que l'une des jambes antérieures, la droite, communiquait avec l'autre pôle. Si le courant envahissait les nerfs dans la direction de leur ramification, la grenouille agitait les extrémités inférieures au moment où l'on fermait le circuit; et à l'instant où on l'interrompait, elle poussait un cri prolongé de toute la force de ses poumons et se soulevait en même temps avec des contorsions, sur ses membres antérieurs sans agiter les inférieurs. Si le courant pénétrait les nerfs en sens contraire de leur ramification, c'était quand on établissait les communications que la grenouille faisait entendre son cri accompagné de contorsions et qu'elle le répétait si on laissait le circuit fermé pendant quelque temps, et quand on l'interrompait les extrémités postérieures s'agitaient et l'animal cessait de crier et de présenter des contorsions.

M. Marianini cite une expérience curieuse à l'appui de la distinction qu'il a établie entre les contractions idiopathiques et les sympathiques, et de la différence d'effet du courant dans le cas où circulant dans les nerfs il les parcourt dans le sens de leur ramification ou en sens contraire. Elle consiste simplement à mettre sa main droite en communication avec l'un des pôles d'une pile, le positif par exemple, et la gauche avec l'autre, le négatif; l'on ressent toutes les fois que le circuit est fermé une contraction dans les deux bras, mais plus forte dans le gauche que dans le droit; si l'on fait passer le courant en sens contraire, c'est le droit qui éprouve la contraction la plus forte. On

obtient un effet analogue en faisant communiquer l'un des pôles avec le bras et l'autre avec le pied. La contraction est plus forte dans le membre où le courant circule dans le sens de la ramification des nerfs, parce qu'elle est à la fois sympathique et idiopathique que dans l'autre membre où elle n'est qu'idiopathique. Il paraîtrait que chez les individus sensibles aux effets de l'électricité, la secousse est accompagnée dans le dernier cas d'une sensation particulière qui n'a pas lieu dans le premier cas où elle est plus forte.

M. Nobili, à la suite d'une analyse très-complète des phénomènes décrits par Marianini, est arrivé à distinguer cinq périodes dans le degré d'irritabilité de la grenouille, la première dans laquelle il y a contraction avec le courant direct et le courant inverse, soit qu'on établisse, soit qu'on ouvre le circuit; la seconde dans laquelle il n'y a plus de contractions quand on établit le courant inverse; la troisième quand cessent aussi les contractions à la rupture du courant direct; la quatrième quand il ne reste plus que les contractions dues à l'établissement du courant direct; enfin la cinquième quand il n'y a plus de contractions du tout dans aucun cas. Il est clair qu'il faut toujours opérer avec le même arc voltaïque, car toutes les limites seraient reculées si la force du courant était plus considérable. Dans toutes ces expériences, M. Nobili opérait sur le nerf seul en appliquant aux extrémités d'un nerf crural isolé les deux bouts de l'arc voltaïque, en ayant bien soin de ne pas toucher le muscle.

Pendant que le courant circule il n'y a pas de contractions sensibles, ce qui ne prouve pas qu'il n'y ait pas un certain effet produit sur le nerf par le courant. Volta avait déjà remarqué qu'une grenouille laissée une demi-heure dans le circuit d'une pile ne se contracte plus sous l'action du même courant, tandis qu'elle éprouve une agitation très-vive si on la soumet à l'action d'un courant inverse. On voit bien par là que l'action continue d'un courant ne désorganise pas le nerf, mais qu'elle l'altère cependant jusqu'à un certain degré en le mettant dans un état différent de son état naturel; si l'action a duré peu de temps, le nerf ne s'est pas habitué à son nouvel état, aussi,

quand le courant cesse, il reprend immédiatement son état naturel et une nouvelle invasion du courant détermine les mêmes effets. Mais quand par la durée de l'action il s'est habitué à son nouvel état, il peut s'y maintenir plus ou moins longtemps, même quand la cause qui a produit sur lui cette altération n'existe plus. Aussi, si après avoir suspendu un moment le courant, on le fait agir de nouveau, il ne produit point d'effet parce qu'il retrouve le nerf encore dans la disposition qu'il tend à produire chez lui. Il n'en est plus de même quand on change la direction du courant; plus le nerf s'était habitué à l'effet du premier courant, moins il supportera facilement l'action du second. L'expérience n'enseigne pas en quoi consistent les modifications qu'éprouve le nerf sous l'action des courants direct et inverse; seulement elle nous montre que l'une des modifications est bien différente de l'autre; M. Nobili appelle l'une *altération directe*, c'est celle qui est produite par le courant direct; et l'autre, qui est produite par le courant inverse, *altération inverse*.

L'animal peut donc se trouver dans trois états, l'état naturel avant que le courant ne passe, l'état d'altération directe et l'état d'altération inverse. Pour qu'il y ait secousse, il faut deux conditions, la première que le nerf passe d'un état à l'autre, la seconde que ce passage ait lieu rapidement. M. Marianini avait remarqué, en effet, que si le passage d'un état à l'autre, c'est-à-dire l'établissement où la rupture du courant se fait lentement et graduellement, la secousse est nulle ou très-faible. Le passage d'un état à l'autre détermine une secousse; et comme il y a quatre passages possibles, il y a quatre secousses dont deux sont comparativement *plus faibles* en comparaison des deux autres *plus fortes* qui persistent plus longtemps. Voici en effet l'ordre dans lequel elles disparaissent : *la plus faible* qui appartient au courant inverse au moment où on l'établit, *la moins faible* qui appartient au courant direct au moment où on l'interrompt, *la moins forte* qui appartient au courant inverse au moment où on l'interrompt, *la plus forte* qui appartient au courant direct au moment où on l'établit.

Dans la première période de grande excitabilité, les diffé-

rences entre les quatre contractions sont trop petites pour pouvoir être saisies; pour se rendre compte de ce qui a lieu dans les autres, M. Nobili suppose que le nerf possède une structure qui le rend propre à propager certains mouvements dans le sens de ses ramifications, d'où résulte que le courant direct, agissant sur le nerf dans le sens de ses fibres, il produit une contraction, tandis que le courant inverse agissant dans une direction contraire n'en produit point ou n'en produit une que lorsque le nerf, étant très-irritable, il est capable, comme une corde élastique, de propager le mouvement qu'il reçoit dans deux directions, mais avec plus d'intensité cependant dans celle suivant laquelle agit la force. Si la circulation du courant direct tend à altérer la structure du nerf dans le sens de ses fibres et dans celui de ses ramifications, celle du courant inverse tend à l'altérer dans la direction opposée, ce qui fait que pour une même intensité du courant, la première altération donnera au nerf un état moins forcé que la seconde. Il en résultera que l'interruption du courant devra produire une secousse moins forte dans le cas du courant direct que dans le cas du courant inverse qui constitue le nerf dans un état plus éloigné de celui qui lui est naturel.

Telles sont, en résumé, les idées de M. Nobili, qui, lors même qu'elles ne peuvent être admises sous la forme trop explicite qu'il leur a donnée, n'en ont pas moins, comme nous le verrons, un fondement de vérité. Ajoutons encore quo la loi des contractions, telle qu'il l'a formulée, varie avec la force du courant, et qu'en particulier les courants forts sont proportionnellement plus actifs quand on interrompt que quand on ferme le circuit, et que c'est l'inverse pour les faibles, ce qui tient à l'altération plus grande que les premiers produisent dans les nerfs. Du reste, M. Nobili a reconnu que sa loi des contractions n'est point modifiée par la présence des muscles dans le circuit; et, en effet, on obtient les mêmes effets en plaçant la grenouille de façon que le courant passe du nerf crural dans ses membres inférieurs, que lorsqu'il passait dans une portion du nerf seulement. Mais il n'en est plus de même si le courant traverse les muscles seuls : la secousse n'a lieu alors que lorsqu'on ferme

le circuit, et on n'observe plus celles qui étaient produites quand on l'interrompait, vu qu'elles étaient dues à l'altération du nerf que parcourait le courant.

Nous devons revenir ici un instant sur l'un des phénomènes que nous avons décrit en passant, mais qui mérite un examen plus approfondi, c'est celui auquel les physiciens se sont accordés à donner le nom d'*alternatives voltaïques*, à cause de Volta, qui l'observa le premier. Nous avons vu que ce célèbre physicien ayant mis à cheval, sur deux verres d'eau placés dans le circuit de la pile (fig. 259), une grenouille récemment tuée et préparée à la manière de Galvani, remarqua que si le circuit était resté constamment fermé pendant une demi-heure, les jambes de l'animal ne se contractaient plus quand on ouvrait et qu'on fermait le circuit. Mais en faisant passer un courant en sens contraire du premier, on ne pouvait ni ouvrir ni fermer le circuit sans que les contractions ne se renouvelassent chaque fois. Si on faisait agir de nouveau le courant pendant une demi-heure, les muscles perdaient dans ce second état toute leur contractilité, mais ils la regagnaient en reprenant leur première position. En opérant ainsi ces changements de demi-heure en demi-heure, et même plus souvent, on pouvait pendant un jour entier, et plus longtemps encore, annuler ou ranimer à volonté l'excitabilité naturelle des muscles de l'animal.

L'affaiblissement qu'éprouve la faculté de la grenouille de se contracter est d'autant plus considérable que le courant est plus fort; mais, quoique en général elle puisse se contracter de nouveau sous l'action d'un courant plus intense, cependant sa sensibilité se trouve affaiblie; c'est ce que M. Marianini a très-bien démontré au moyen de deux grenouilles parfaitement semblables, préparées de la même manière et en même temps, dont l'une avait été laissée en repos, pendant que l'autre avait été soumise à l'action du courant de 40 couples : l'opération avait duré une demi-heure; au bout d'une seconde demi-heure, la première grenouille était encore sensible au courant d'un seul couple presque autant qu'en commençant, tandis que la seconde demeurait immobile dans l'action de 2 couples.

Si l'animal est vivant, la force vitale répare les atteintes portées par le courant aux organes du mouvement. M. Marianini s'en est assuré en faisant passer le courant électrique de 60 couples d'une des jambes de la grenouille vivante à l'autre au moyen de deux bandelettes de plomb. Il suffit qu'elle obtienne quelque relâche lorsque ses contractions musculaires ont faibli sous l'action du courant pour que, retrouvant sa force primitive, ses contractions reprennent leur vigueur sans qu'il soit nécessaire de la soumettre à l'action d'un courant contraire. Ce principe réparateur ne cesse pas entièrement avec la vie ; il subsiste, du moins en partie, pendant quelque temps après la mort ; toutefois c'est dans l'animal vivant qu'il jouit de la plus grande énergie.

Cet affaiblissement de l'excitabilité des nerfs se manifeste principalement dans la portion qui est traversée par le courant, ainsi que l'a prouvé Matteucci en appliquant le courant à une portion du nerf plus éloignée du cerveau que ne l'était celle sur laquelle on avait opéré assez longtemps pour faire cesser les contractions; on voit aussitôt reparaître les contractions et les mêmes phénomènes qu'auparavant ; en poursuivant ces expériences de manière à agir sur des portions de nerf encore plus éloignées du cerveau, on obtient encore les mêmes effets. Si l'animal est vivant, on trouve par contre que les signes de douleur qu'il manifeste quand un courant parcourt ses nerfs, se raniment si l'on agit sur des parties de plus en plus voisines du cerveau, à mesure que sa vivacité diminue par le passage prolongé du courant. Dans les deux cas également, c'est toujours l'excitabilité des nerfs qui s'affaiblit par ce passage. Cette expérience est importante en ce qu'elle montre qu'on ne peut attribuer le phénomène des alternatives voltaïques, comme le fait Marianini, à ce qu'une partie de l'électricité qui envahit les organes du mouvement s'y arrête pendant quelque temps et s'y accumule de plus en plus jusqu'à ce que, par une tendance à refluer, elle s'oppose au courant qui survient dans les mêmes organes, de manière que l'action de ce courant devienne nulle ou excite des contractions plus faibles qu'au commencement de l'expérience. D'ailleurs, rien

ne démontre cet arrêt de l'électricité qui serait comme une espèce de polarisation des parties extrêmes des portions de la grenouille mises dans le circuit. Nous voyons donc, comme Nobili l'a si clairement exposé, que le courant électrique détermine dans la portion du nerf qu'il parcourt une altération d'autant plus forte que son passage est plus prolongé, altération qui rend le nerf incapable de transmettre l'action d'un courant agissant dans le même sens, et qui ne peut disparaître que par le passage d'un courant dirigé en sens contraire ou par un repos de quelque durée, jusqu'à ce que, par des actions répétées, le nerf ait perdu toute excitabilité. Quelle est la nature de cette altération? Il est probable qu'elle est liée à l'état dans lequel la transmission du courant constitue le nerf, état qui, par analogie avec ce qui se passe dans tous les autres cas, doit être une polarisation des molécules alternant avec des décharges moléculaires. On conçoit que tant que le nerf a une vitalité suffisante il réagisse dès que le courant cesse, pour que les molécules reprennent leur position naturelle, mais qu'il peut arriver un moment où cette réaction n'ayant plus lieu, il faut un courant dirigé en sens contraire pour la déterminer.

Un fait important observé par Matteucci vient à l'appui de notre manière de voir; ce savant physicien a observé que la ligature d'un nerf, par exemple, du nerf crural d'un lapin, produit le même effet qu'aurait déterminé le passage prolongé du courant dans la partie du nerf comprise entre les deux ligatures. Ainsi, si l'on fait passer le courant au-dessous de la ligature, on observe les contractions de la jambe, et si on le fait passer au-dessus, il n'y a plus de contraction, mais des signes de douleur, parce qu'il y a communication avec le cerveau sans ligature intermédiaire. Il faut, pour bien faire cette expérience, avoir soin d'isoler le nerf des parties humides qui l'entourent et de serrer convenablement la ligature; sans cela une partie du courant peut passer au-dessus ou au-dessous de la ligature et troubler les résultats. Il faut remarquer que la ligature n'intercepte point le courant, mais affaiblit ses effets, de sorte que si l'on place l'un des pôles au-dessus, l'autre au-dessous de la ligature, les phénomènes sont les

mêmes que s'il n'y avait pas de ligature, mais seulement plus faibles. Pour toutes ces expériences ce qu'il y a de mieux, c'est de se servir de la grenouille préparée de la manière habituelle et de la suspendre par son nerf (fig. 257).

Un des caractères qui établissent la différence la plus marquée entre l'action physiologique de l'électricité et celle des autres agents, c'est la liaison qui existe entre le sens de la propagation du courant et la direction des nerfs et de leurs ramifications. Nous avons même déjà remarqué que le courant électrique ne produit aucun des effets dus à l'excitabilité des nerfs quand il est transmis transversalement à ce nerf. Voici comment Matteucci a démontré ce point important. Deux jambes de grenouille sont préparées et séparées (fig. 262), de façon que leurs filets nerveux se croisent à angle droit; l'un des nerfs est coupé de façon que les deux extrémités de la section opérée soient à une distance l'une de l'autre de 2 centimètres environ et seulement de 1 centimètre du nerf de l'autre jambe qui passe à travers la section; une goutte d'eau distillée établit une communication entre les deux tranches du nerf coupé. On touche alors les points *a* et *b* du nerf coupé avec les pôles d'une pile composée d'un assez grand nombre de couples; le courant traverse, non-seulement l'eau, mais le nerf interposé; cependant la jambe à laquelle ce nerf appartient n'éprouve aucun effet pendant que l'autre éprouve de fortes contractions. Toutefois, si la pile est encore plus forte, on finit par apercevoir quelques contractions dans la jambe dont le nerf est traversé transversalement par le courant; mais elles sont beaucoup plus faibles que dans l'autre jambe.

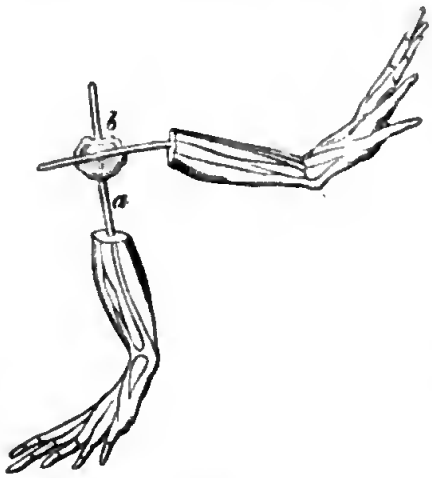


Fig. 262.

Au milieu des recherches multipliées dont l'action physiolo-

gique du courant a été l'objet, nous nous bornerons à en signaler encore ici quelques-unes, soit à cause de leur importance, soit parce que nous n'aurons pas occasion d'y revenir, comme pour les autres, en nous occupant de l'électricité animale.

L'une de celles que nous avons en vue, c'est la détermination que M. Matteucci a essayé de faire du rapport qui existe

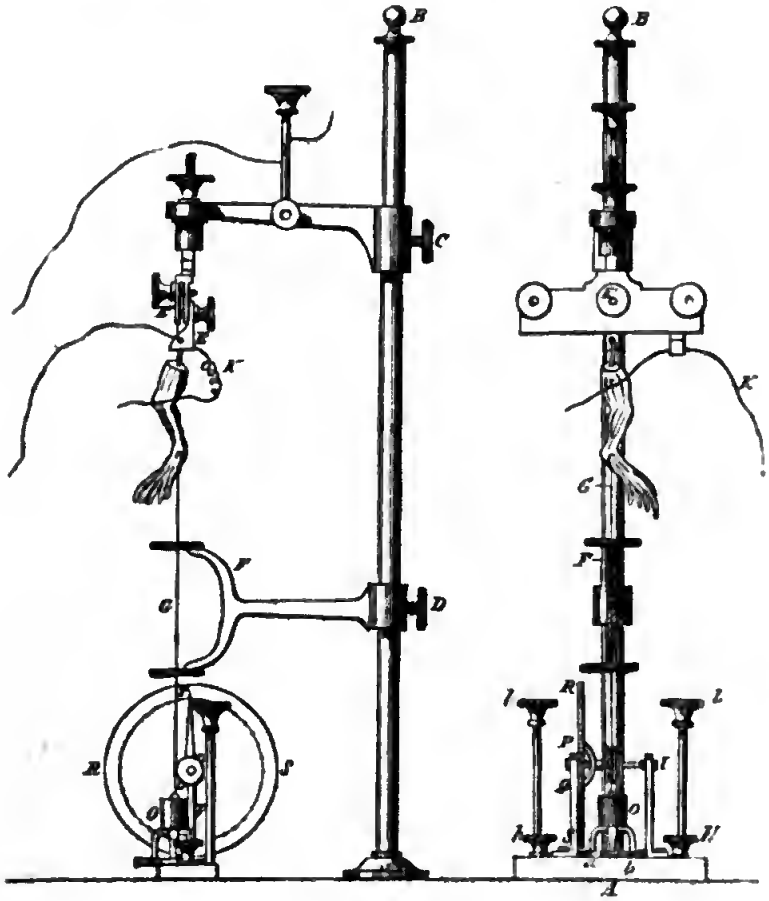


Fig. 263.

entre la quantité d'électricité transmise et la contraction excitée par cette quantité d'électricité dans un nerf d'un animal vivant ou tué le plus récemment possible. L'appareil qu'il emploie consiste principalement dans une tige solide en laiton A B (fig. 263), fixée sur un plan de bois, et dans laquelle glissent à angle droit deux pièces métalliques C et D, qui peuvent

se fixer en différents points par des vis de pression. La pièce C porte la pince E, dans laquelle on introduit et l'on serre avec trois vis les morceaux de moelle épinière de la grenouille préparée. L'autre pièce F, en forme de fourche, est disposée de manière à avoir deux trous à ses deux extrémités, dans lesquels est introduit et se trouve réglé un fil métallique très-mince. Ce fil G se termine, d'une part, par un crochet qui est fixé à la patte de la grenouille; de l'autre, il est attaché à un fil de soie qui s'enroule sur la petite poulie I. Sur cette même poulie est enroulé, en sens contraire, un autre fil de soie auquel est attaché un petit poids de plomb O. L'axe de la poulie porte une espèce de double index P Q, qui a la forme d'un demi-cercle. Cet axe est fixé sur deux pivots qui peuvent se rapprocher plus ou moins. Un de ces pivots est au centre d'un cercle R S qui porte une division. Dans ce même pivot est introduite une longue aiguille en ivoire T V très-légère, et qui tourne avec le moins de frottement possible. Il n'est pas difficile de concevoir l'usage de cet index d'ivoire. En effet, si l'on porte cet index en contact avec l'autre, qui a la forme d'un demi-cercle P Q et qui est fixé à l'axe de la poulie, il arrivera qu'en tournant cette poulie l'index d'ivoire sera aussi poussé, et il s'arrêtera au point où il est arrivé, lors même que la poulie sera ramenée à sa position par le petit poids. Il faut dire que, sans cet index d'ivoire, il aurait été impossible de juger de l'étendue du mouvement de la poulie produit par la contraction, à cause de sa très-courte durée. Le poids employé était de 0,600; c'est assez pour que, la contraction ayant cessé, le membre revienne à sa position; un poids plus fort tiraillerait trop le nerf. Voici comment on fait passer le courant : c'est toujours une demi-grenouille, à laquelle les muscles et les os du bassin ont été enlevés, qui est soumise à l'expérience. La demi-grenouille se réduit ainsi à un morceau de moelle épinière qui est serré dans la pince E′, au filament nerveux, à la cuisse et à la jambe seule, ayant coupé la patte. Le crochet du fil G est introduit entre l'os et le tendon d'Achille. Enfin une aiguille d'acier doré est introduite dans les muscles de la cuisse, le plus près possible de l'insertion du nerf; à cette aiguille est soudé

un fil de cuivre K, très-mince et recouvert de soie, qui est fixé à un morceau E d'ivoire. Il est clair que, pour faire passer le courant à travers le nerf, il n'y a qu'à toucher avec les pôles de la pile la tige A B dans un point quelconque, et le fil métallique K qui est soudé à l'aiguille d'acier.

Maintenant pour opérer, il faut faire passer un courant électrique ou une certaine décharge de la bouteille de Leyde par une certaine longueur du nerf de la grenouille; l'effet électro-physiologique est la contraction du membre qui, dans un certain temps, s'élève à une certaine hauteur. Mais la difficulté est de faire passer des quantités d'électricité qui soient entre elles dans des rapports donnés, afin de les comparer à l'effet électro-physiologique correspondant. D'abord il faut employer un courant très-faible pour que les effets ne soient pas tous à leur maximum; le courant d'un couple, affaibli même par son passage à travers l'eau, est suffisant; puis, pour faire passer dans le même nerf, tantôt la moitié, tantôt le tiers ou le quart de l'électricité, M. Matteucci interpose entre la pince et la cuisse un, deux, trois nerfs aussi semblables que possible, soit entre eux, soit au nerf soumis à l'expérience; et admettant comme approximativement vrai que la moitié du courant passe dans chacun des nerfs quand il y en a deux, le tiers quand il y en a trois, et ainsi de suite, il se trouve réduire dans la proportion voulue le courant qui passe par le nerf principal[1]. Voici une des nombreuses expériences que M. Matteucci a faites de cette manière :

Nombre des nerfs.	Degrés de la contraction.
1	26°
2	14°
3	8°

Quoiqu'en général les résultats diffèrent assez notablement entre eux, ce qui est inévitable dans ce genre d'expériences, M. Matteucci croit pouvoir en conclure que *l'effet physiologique est proportionnel à l'intensité du courant électrique.*

[1] Il est vrai qu'en augmentant le nombre des nerfs, le courant total doit augmenter, mais comme les nerfs sont des conducteurs très-imparfaits, cette augmentation n'est pas considérable.

Toutefois, il n'est pas probable que ce genre d'action soit soumis à des lois aussi précises, et un savant allemand, qui a fait de grands et importants travaux sur ce sujet, M. Du Bois-Reymond, a cru pouvoir établir la loi fondamentale que voici, comme régissant l'excitation électrique, savoir : que *les nerfs moteurs ne sont pas excités par la grandeur absolue de la densité*[1] *du courant, mais par les variations qu'éprouve le montant de cette densité d'un instant à l'autre ; l'excitation causée par ces changements étant d'autant plus grande qu'ils ont lieu plus rapidement, ou qu'ils sont plus considérables dans un temps donné.* Or, cette loi, établie par de nombreuses expériences, ne peut se concilier avec celle de M. Matteucci. On peut, comme l'a fait M. Du Bois-Reymond, figurer dans chaque cas ces effets par deux courbes, dans lesquelles les abcisses représentent le temps, et les ordonnées représentent dans l'une des courbes la densité du courant dans le nerf, et dans l'autre la valeur de l'excitation ; mais ce ne sont que des résultats très-approximatifs. Un cas très-curieux est celui dans lequel l'excitation est produite par une série de décharges successives qui se suivent très-rapidement les unes les autres, par exemple au moyen d'un appareil comme la roue dentée de Masson, qui interrompt et rétablit le courant d'une manière très-rapide. L'effet d'une semblable série de décharges est de produire une contraction tétanique des muscles, comme Volta l'a observé le premier, et comme l'a signalé ensuite Nobili avec plus de détails[2]. On est appelé souvent, dans les expériences d'électricité animale, à déterminer ainsi le tétanos dans les membres d'un animal.

Nous ne terminerons pas ce qui est relatif à l'action du courant électrique sur les nerfs, sans dire quelques mots de l'application qu'on en a faite à la construction d'un galvanoscope physiologique. Quoique le galvanomètre multiplicateur magné-

[1] M. Du Bois-Reymond désigne, par le nom de densité du courant dans une section du circuit, le quotient de l'intensité du courant divisé par la grandeur de la section du conducteur.

[2] C'est un effet de ce genre qu'on éprouve dans l'expérience de Massou, dont nous avons parlé dans le paragraphe précédent.

tique soit devenu, surtout avec les perfectionnements que Du Bois-Reymond a introduits dans sa construction [1], un instrument éminemment propre à la perception et à la mesure des courants dus à l'électricité animale, cependant il est des cas où son emploi est insuffisant, et présente même des inconvénients. Dans ces cas on peut se servir avec avantage du galvanoscope physiologique, dont Nobili le premier fit usage en employant la grenouille préparée à la manière de Galvani (fig. 258). Matteucci et Du Bois-Reymond ont trouvé qu'il était préférable, au lieu d'employer, comme Nobili, la grenouille entière, d'en détacher simplement une cuisse munie de son nerf, qu'on peut placer dans un tube verni pour la bien isoler (fig. 264), de manière à ne laisser sortir que la portion du nerf qu'on veut insérer dans le circuit soumis à l'expérience. Il est en effet important d'être certain que, ni le courant propre de la cuisse, ni aucun courant autre que celui qu'on étudie, ne traverse ce nerf. La contraction de la cuisse indique le passage d'un courant dans le nerf, mais seulement au moment où ce passage commence et finit, ce qui fait que ce galvanoscope ne peut indiquer si la décharge est instantanée ou continue.

Fig. 264.

Entre autres applications qu'on a faites du galvanoscope physiologique, nous en signalerons une qui est due à M. Du Bois-Reymond, et qui consiste à montrer le développement d'électricité dynamique qui peut avoir lieu par l'induction opérée au moyen d'un aimant ou d'un courant dans un circuit qui n'est pas fermé, tel qu'un fil métallique. Il suffit de placer une grenouille galvanoscopique à chacune des extrémités de ce fil pour la voir se contracter dès qu'on approche le courant ou l'aimant inducteur, pourvu qu'on la touche en même temps avec le doigt pour déterminer le passage du courant induit. Il suffit même de toucher l'une des grenouilles pour que

[1] Tome I, page 329.

l'autre se contracte aussi, si elles sont suffisamment sensibles. On peut obtenir encore un effet sur la grenouille en touchant avec son nerf un conducteur imparfait, tel qu'un fil humide qui unit les deux extrémités du circuit induit ouvert ; mais il faut pour cela que la grenouille ne soit pas isolée et que son nerf touche le fil près de l'un des bouts du fil induit, et si elle n'est pas très-sensible, elle n'éprouve de contractions que lorsque le bout près duquel est son nerf, est celui par où arrive l'électricité positive. On peut remplacer le fil humide par un nerf, de sorte qu'on peut exciter des contractions dans la grenouille galvanoscopique simplement en faisant passer un courant induit à travers la portion du nerf qui est au-dessus d'une ligature, ce qui peut donner lieu à des erreurs dans l'étude de l'électricité animale si on n'y fait pas très-attention.

Cette dernière espèce d'action se rapproche beaucoup de celle qu'a décrite M. Matteucci, sous le nom de contraction induite, avec cette différence que, dans ce dernier cas, le nerf de la grenouille électroscopique est affecté non par un courant électrique, mais par son contact avec le nerf d'une autre grenouille, effet qui tient, comme nous le verrons, à l'électricité qui probablement circule dans ce nerf. Au reste, ce n'est que lorsque nous aurons étudié dans la cinquième partie consacrée aux sources de l'électricité, l'électricité animale elle-même, que nous pourrons avoir des notions plus justes et plus complètes sur l'action physiologique de l'électricité en général, dont les effets se compliquent nécessairement de ceux qui sont dus à l'électricité propre de l'animal.

Dans tout ce qui précède nous ne nous sommes occupés que des effets qui résultent du passage de l'électricité dynamique, soit à travers les nerfs seulement, soit à travers les nerfs et les muscles à la fois, quand la décharge ou le courant parcourent l'animal dans toute sa longueur. Il nous reste à dire quelques mots de l'action du courant sur la fibre musculaire isolée. Cette recherche est très-difficile, parce que, lors même qu'on a enlevé à un muscle tous les filets nerveux qui sont visibles, il est difficile qu'il n'y reste aucune trace de substance nerveuse ; néanmoins, on peut, en prenant toutes les précautions nécesaires,

arriver à des résultats qui sont passablement exacts. Ainsi on s'assure, en faisant passer le courant d'une pile de 30 à 40 couples à travers le muscle pectoral d'un pigeon dépouillé de ses nerfs aussi bien que possible, que les fibres musculaires se contractent quand on ferme et qu'on ouvre un circuit, et cela quelle que soit la direction du courant relativement à celle des fibres. Ces contractions cessent pendant le passage du courant, mais elles reparaissent, quoique plus faibles, lorsque après avoir interrompu le circuit, on le rétablit, à moins toutefois que le premier passage n'ait été très-prolongé, dans quel cas les contractions ne peuvent plus se produire.

L'effet que nous venons d'indiquer ne peut être dû qu'à l'action directe du courant sur la fibre musculaire, car, lors même qu'il resterait quelques filets nerveux dans le muscle, comme la matière nerveuse est beaucoup moins conductrice, environ quatre fois moins que la matière musculaire, c'est essentiellement celle-ci qui est traversée par l'électricité [1]. M. Matteucci, à qui nous devons ces observations, a de plus prouvé directement qu'aucune partie du courant ne passe à travers les petits filaments nerveux quand il parcourt le muscle; pour cela, il prend le muscle de la jambe d'un lapin ou d'un chien,

[1] Pour déterminer la conductibilité relative des nerfs et des muscles, M. Matteucci a pris sur un lapin récemment tué, un morceau assez long du nerf sciatique, une couche de substance cérébrale, et un morceau de muscle enlevé à la cuisse. Il a réduit ces trois substances en tranches de même épaisseur, autant que possible, et il les a placées à la suite les unes des autres sur un plan isolant; puis il a fait passer par cette chaîne de substances animales le courant d'une pile de 12 couples. Il a touché alors avec les extrémités en platine d'un galvanomètre sensible, tantôt l'une, tantôt l'autre des substances animales, les deux fils étant toujours tenus à la même distance, et il a obtenu ainsi les déviations produites par des courants dérivés tirés dans les mêmes circonstances des trois substances nommées. Il a encore fait l'expérience d'une autre manière, en faisant varier la distance des deux fils de platine, de manière à avoir un courant dérivé de même intensité en opérant sur les trois substances. Le courant dérivé, dans le premier cas, est d'autant plus fort que la substance est moins conductrice; aussi est-il plus faible avec le muscle qu'avec le nerf, et avec le nerf qu'avec la substance cérébrale, d'où il résulte que cette substance conduit un peu moins bien que le nerf, et celui-ci quatre fois moins bien environ que le muscle.

morts depuis assez longtemps pour que toute irritabilité musculaire ait disparu, puis il fait dans ce muscle une incision et y a introduit le nerf d'une grenouille galvanoscopique très-sensible (fig. 264), de manière qu'il fût bien recouvert du muscle. Dès que les contractions qui se manifestent dans la grenouille au premier moment ont cessé, il fait passer le courant d'une pile de 20 à 30 couples à travers la masse du muscle en appliquant les électrodes sur différents points de cette masse, et quoique ce courant énergique traverse le muscle dans toutes les directions, la grenouille n'éprouve aucune contraction; cependant son nerf est contenu dans ce muscle et en fait presque partie intégrante. Il faut avoir soin d'employer un muscle dont l'irritabilité soit éteinte, car sans cela la grenouille éprouve des contractions, qui sont dues au phénomène de la contraction induite dont nous nous occuperons plus tard.

Revenant à la contraction excitée directement sur les muscles, nous remarquerons encore que, lorsqu'elle a lieu par l'effet de la décharge d'une bouteille de Leyde, elle occasionne dans le muscle une raideur cadavérique persistante accompagnée d'un raccourcissement; c'est un effet semblable à celui que Nobili, Masson et Matteucci, ont successivement obtenu en faisant passer un courant discontinu à travers le nerf d'un animal, ce qui détermine un véritable tétanos; tétanos qu'on peut faire cesser, soit par le passage d'un courant inverse de celui qui l'a produit, soit en coupant le nerf qui communique avec le membre tétanisé.

Nous terminerons ici ce que nous avons à dire pour le moment sur les effets physiologiques de l'électricité; nous reviendrons sur bien des points que nous avons omis, tels en particulier que l'influence sur les effets de l'électricité des poisons et narcotiques administrés préalablement aux animaux, ainsi que sur l'analyse des sensations que détermine chez les hommes le passage de l'électricité dynamique dans diverses parties de leurs organes. Ces sujets, ainsi que d'autres analogues, trouveront naturellement leur place dans le chapitre de la sixième partie de ce traité qui sera consacré aux applications thérapeutiques de l'électricité; et ils pourront être traités d'une manière beaucoup plus complète alors, parce que nous aurons étudié, ce que

nous n'avons pas encore fait, les phénomènes relatifs à la production de l'électricité par les actions physiologiques, qui sont désignés sous le nom d'*électricité animale*.

Liste des principaux travaux relatifs aux sujets traités dans ce chapitre :

Davy. — Décomposition électro-chimique des substances organiques. — *Annales de ch*. T. LXIII, p. 223, 255 et 261.

Gay-Lussac. — Effets de l'électricité sur la fermentation du moût. — *Annales de ch*. T. LXXVI, p. 257.

Becquerel. — Application des forces électro-chimiques à la physiologie végétale. — *Annales de ch. et de phys*. T. LII, p. 57.

Matteucci. — Influence de l'électricité sur la germination. — *Annales de ch. et de phys*. (*nouvelle série*). T. II, p. 403. — Recherches électro-physiologiques. — *Annales de ch. et phys*. (*nouvelle série*). T. II, p. 403; t. XIX, p. 52; t. XXIII, p. 241. — *Trans. phil. de la Soc. roy. de Londres*, années 1846, 1847, 1849 et 1850. — Traité des phénomènes électro-physiologiques des animaux. — Paris, 1844, in-8° avec planches.

Dutrochet et Becquerel. — Influence de l'électricité sur la circulation du chara. — *Bibl. univ*. (*nouvelle série*). T. XII, p. 394 (1837).

Lassaigne. — Précipitation de l'albumine au pôle positif. — *Annales de ch. et de phys*. T. XX, p. 97.

Galvani. — Résumé de ses travaux électro-physiologiques. — *Annales de ch. et de phys*. T. XXV, p. 58.

Humboldt. — Irritation causée par les métaux sur les animaux. — *Annales de ch*. T. XXII, p. 51.

Ure. — Expériences électriques sur un cadavre. — *Annales de ch. et de phys*. T. XIV, p. 337.

Lenz. — Conductibilité électrique du corps humain. — *Archives d'électricité*. T. III, p. 534.

Pouillet. — *Idem*. — *Compte rendu de l'Acad. des sciences*. T. IV, p. 791.

Masson. — Effets physiologiques des courants discontinus. — *Annales de ch. et de phys*. T. LXVI, p. 5.

Philipps. — Action du courant remplaçant celle des nerfs. — *Annales de ch. et de phys*. T. XXII, p. 216.

Volta. — Électricité animale. — *Annales de ch*. T. XXIII, p. 276, et t. XXIX, p. 91.

Marianini. — Mémoires divers relatifs à l'action physiologique du courant. — *Annales de ch. et de phys*. T XL, p. 225; t. XLIII, p. 320; t. LVI, p. 387.

Nobili. — *Idem*. — *Annales de ch. et de phys*. T. XXXVIII, p. 225; t. XLIV, p. 60.

Du Bois-Reymond. — *Idem*. — *Ann. der physik passim*. — *Untersuchungen über thierische electricital*. Berlin. 1848. T. I.

CINQUIÈME PARTIE

SOURCES DE L'ÉLECTRICITÉ

CHAPITRE PREMIER.

ÉLECTRICITÉ PRODUITE PAR L'ACTION DE LA CHALEUR.

§ 1. Développement de l'électricité par l'action calorifique dans les mauvais conducteurs.

Après avoir étudié les propriétés de l'électricité, soit sous le rapport des lois générales auxquelles elle est soumise dans ses différentes formes, soit sous le rapport des effets qu'elle produit dans les corps en les traversant, il nous reste à examiner les divers moyens par lesquels on lui donne naissance. Les sources de l'électricité sont de deux espèces : *artificielles* et *naturelles*. Sous la première dénomination, nous comprenons l'action de la chaleur, les actions mécaniques et les actions chimiques. Nous rangeons sous la seconde l'électricité animale et l'électricité atmosphérique. Nous allons sommairement examiner ces différentes sources en cherchant à découvrir les lois qui régissent le développement de l'électricité à laquelle elles donnent naissance ; puis nous chercherons, après les avoir étudiées, ce qu'elles ont de commun et les principes généraux qui les rattachent les unes aux autres, en même temps que nous y ferons rentrer certains phénomènes dans lesquels il y a production d'électricité sans cause apparente. Nous commençons cette étude par l'action de la chaleur considérée comme source d'électricité, vu qu'elle est des trois sources celle qui est la moins complexe.

L'influence de la chaleur sur l'électricité a été aperçue dès les

premiers temps où l'on s'est occupé des phénomènes électriques; on a bien vite remarqué que l'élévation de température facilitait le dégagement de l'électricité opéré par le frottement dans le verre et les corps isolants, comme nous le verrons dans le chapitre suivant. Il y a plus; l'élévation de température suffit à elle seule sans autre action, pour rendre électriques des corps qui ne l'étaient pas. Cette propriété, constatée pour la première fois dans la tourmaline, a été reconnue appartenir à d'autres cristaux et a reçu le nom de *pyro-électricité* pour la distinguer de la *thermo-électricité*, dénomination qu'on a réservée à l'ensemble des phénomènes électriques développés par la chaleur dans les corps conducteurs, et qui feront l'objet des paragraphes suivants.

Pline parle déjà d'une pierre dure violette ou rouge foncé, qui, échauffée au soleil ou frottée avec les doigts, attire des petits corps légers. A la fin du dix-septième siècle, des marchands hollandais rapportèrent de l'île de Ceylan une pierre à laquelle les naturels avaient donné le nom de *tournamal* ou *tire cendres*; et qui, posée sur des cendres chaudes, les attirait et les repoussait ensuite, tandis qu'elle ne manifestait aucun phénomène semblable sur des cendres froides; ce minéral était la tourmaline. Æpinus, le premier ayant eu entre les mains en 1757 deux tourmalines polies destinées à servir d'anneau, fit une série d'expériences qui établirent d'une manière précise les lois du développement de l'électricité par la chaleur dans ce cristal. Il constata d'abord la présence de l'électricité libre dans la tourmaline chauffée par l'attraction et la répulsion qu'elle exerce successivement sur un corps léger suspendu à un fil de soie; il en tira même une étincelle visible dans l'obscurité; mais l'observation la plus importante qu'il fit, ce fut celle de la présence simultanée des deux électricités dans la même tourmaline, dont l'une confinée dans une partie du cristal et l'autre dans une autre; ces deux parties constituant les deux pôles électriques opposés de la tourmaline. Æpinus avait cru pouvoir poser en outre comme règle générale que les pôles électriques sont dans la tourmaline, inégalement chauffée, contraires de ce qu'ils sont dans la tourmaline chauffée également; il avait eu

sur ce point quelques contestations avec Wilson, et en général il restait bien des anomalies à expliquer quand Canton arriva à trouver un principe important au moyen duquel il était facile de rendre compte de toutes les contradictions apparentes qui régnaient entre les physiciens sur ce sujet. Ce principe est que ce n'est pas la température absolue, mais le changement de température qui rend la tourmaline électrique, et que l'électricité de chacun de ses pôles varie suivant que ce changement est un réchauffement ou un refroidissement. Plus tard, Bergmann reprit l'observation importante de Canton et analysa avec beaucoup de clarté les diverses phases électriques de la tourmaline, dont il rendit compte d'une manière très-satisfaisante. Ainsi une tourmaline placée dans un milieu dont elle possède la température n'est point électrique. Transportée dans un milieu plus froid auquel elle abandonne sa chaleur, elle prend deux pôles électriques contraires, état qui cesse de nouveau quand la tourmaline a pris la température du milieu. Remise dans le premier milieu, la tourmaline se réchauffe et reprend ses pôles électriques, mais de signes contraires à ceux des premiers pôles, le pôle qui était positif pendant le réchauffement devenant négatif pendant le refroidissement et réciproquement. Cette loi n'est pas seulement vraie pour le cristal dans son entier, mais aussi pour chacune de ses parties séparément, de sorte que si les deux pôles sont disposés de façon que l'un se réchauffe pendant que l'autre se refroidit, ils ont la même électricité en même temps.

En résumé, l'état électrique de la tourmaline peut varier de six manières, savoir, en appelant A et B les deux pôles :

A positif et B négatif;
A négatif et B positif;
A et B positifs;
A et B négatifs;
A positif et B non électrique;
A non électrique et B négatif.

Le premier état ayant été observé quand on transporte la tourmaline d'un milieu froid dans un milieu chaud, on observe le second quand, après avoir plongé le cristal dans un liquide

chaud, on le laisse refroidir après l'en avoir retiré. On obtient le troisième état en tenant l'extrémité B pendant une demi-minute dans la flamme d'une lampe ou d'une bougie, parce que dès qu'on l'en retire, B se refroidit et que A au contraire se réchauffe par conductibilité; mais une fois que A a acquis la plus haute température qu'il puisse avoir, il se refroidit et devient négatif tandis que B reste positif. Le quatrième état s'obtient de la même manière que le troisième, en chauffant A au lieu de B. Pour déterminer le cinquième et le sixième, il suffit de placer le cristal sur une feuille de tôle isolée qui est maintenue à une température constante au moyen d'un fer chaud, et de recouvrir la face supérieure d'une pièce métallique froide. La face qui repose sur la plaque de tôle chaude conserve une température constante et ne possède pas d'électricité, tandis que l'autre qui reçoit de la chaleur par conductibilité, devient électrique ou positivement ou négativement, suivant qu'elle est la face A ou la face B.

Bergmann a encore démontré que les quantités d'électricité positive et négative développées dans le cristal sont exactement dans la même proportion; il a constaté en effet qu'un vase métallique isolé rempli d'eau chaude ne devient point électrique quand on y plonge une tourmaline, preuve que les deux électricités contraires qu'elle y acquiert se neutralisent, et que par conséquent elles sont égales.

On doit encore à Canton une observation très-importante, c'est que lorsqu'on opère non plus sur des tourmalines aplaties comme celles qui servent de pierres pour les bagues, mais sur des tourmalines allongées dont les pôles sont à une distance d'un centimètre au moins l'un de l'autre, on trouve en brisant la pierre en deux ou trois fragments par exemple, que chacun d'eux a deux pôles comme le cristal entier, et que les extrémités des fragments qui étaient en contact avant la rupture, présentent des pôles contraires. On peut pousser la division mécanique d'un cristal pyro-électrique aussi loin qu'on le veut sans faire disparaître les électricités contraires de chaque fragment. Brewster ayant réduit une tourmaline en poudre très-fine, observa que cette poudre restait attachée à une lame

de verre sur laquelle il l'avait placée, dès qu'il chauffait la lame, et que les petits grains, quand on les agitait, s'agglomeraient en globules, propriété qui disparaissait dès que l'élévation de la température cessait d'avoir lieu. Vue au microscope, cette poudre impalpable présente de petits fragments anguleux qui, comme le cristal entier, sont doués de pôles électriques dès qu'on les soumet à un changement de température.

Quand on place une tourmaline de manière que son extrémité inférieure et la supérieure soient les places des deux pôles électriques, toute ligne verticale qui joint ces deux pôles se nomme *l'axe électrique* du cristal. Un plan qui coupe le cristal perpendiculairement à l'axe détermine deux faces qui deviennent également deux pôles contraires, soit l'un à l'autre, soit à celui qui existait déjà sur l'autre face du même fragment. On peut comparer sous ce rapport la tourmaline, soit à un aimant dans la théorie de Coulomb [1], soit encore mieux à une pile sèche [2] qui, lorsqu'on la partage en deux dans une partie quelconque de sa longueur, présente toujours deux pôles opposés. L'analogie est tellement complète qu'on peut imiter avec une pile sèche tous les phénomènes que présente la tourmaline. Ainsi si l'on applique l'une contre l'autre deux piles sèches par leurs pôles semblables, on a aux deux autres pôles libres la même électricité, de la même manière qu'on a la même électricité aux deux extrémités de la tourmaline, si l'une d'elles est soumise à une élévation et l'autre à un abaissement de température. Wilke ayant chauffé une tourmaline d'un seul côté avec les rayons solaires concentrés au foyer d'une lentille, trouva de l'électricité négative aux deux pôles et de la positive au milieu.

Pour observer les différents phénomènes électriques que présente la tourmaline, on peut, comme Becquerel, la placer dans une petite chape de papier suspendue à l'extrémité d'un fil de cocon fixé verticalement dans un cylindre de verre posé lui-même sur une lame de métal dont on élève la température

[1] Tome I, page 189, fig. 78.
[2] Tome I, page 52.

(fig. 265); à mesure que l'intérieur du vase s'échauffe, la température de la tourmaline s'élève, et aussitôt qu'elle devient électrique il suffit de lui présenter un corps faiblement électrisé pour observer les attractions et les répulsions. Pour mieux saisir les changements de polarité dans la tourmaline, qui sont quelquefois très-courts, il faut placer dans l'intérieur de la cloche, et à peu de distance de chaque extrémité du cristal, deux tiges métalliques verticales qui communiquent chacune avec l'un des pôles d'une pile sèche; aussitôt que la tourmaline devient électrique, elle se place entre les deux tiges, les pôles contraires en regard; il est facile de constater ainsi son état électrique et la nature de ses pôles [1].

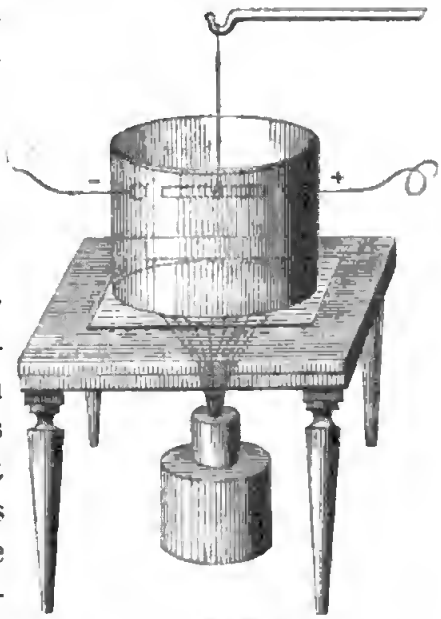


Fig. 265.

Riess, et les physiciens allemands qui se sont beaucoup occupés des phénomènes pyro-électriques, ont adopté une dénomination qui nous paraît très-heureusement choisie pour distinguer l'un de l'autre les deux pôles de la tourmaline, et en général des cristaux pyro-électriques. Ils nomment pôle *ana-*

[1] Un fait assez curieux, que M. Becquerel a constaté au moyen du même appareil, est la polarité électrique que peut acquérir un corps mauvais conducteur placé dans les mêmes circonstances que la tourmaline, quand on en approche un corps électrisé. Ainsi si l'on place dans la chape en papier un petit tube d'un verre très-peu hygrométrique, de 1 millimètre de diamètre, et de 1 à 2 centimètres de longueur, et qu'on lui présente un bâton de gomme laque électrisé, il est attiré par suite de la décomposition de son électricité naturelle. En élevant la température jusqu'à 30°, le tube acquiert la polarité électrique qui disparaît dès que la gomme laque électrisée est retirée; mais si l'on fait naître cette polarité au moment où, après avoir éteint la lampe, la polarité commence, elle persévère plus ou moins de temps lors même que la source électrique qui l'a produite a disparu. Il suffit de réchauffer de nouveau le milieu où est le petit tube de verre pour que la polarité disparaisse.

logue celui pour lequel le signe qui représente la variation de la température et la nature de l'électricité sont semblables, et pôle *antilogue* celui pour lequel ces signes sont contraires. Ainsi le pôle analogue est celui qui s'électrise en + quand il y a élévation de température et en — quand il y a abaissement, et l'antilogue celui qui présente les phénomènes opposés. Il est très-facile de déterminer, au moyen d'un électroscope ordinaire, la nature électrique des deux pôles, mais il l'est moins de trouver leur position exacte, ainsi que celle de l'axe électrique. Les faces naturelles ou artificielles qui limitent le cristal coupent fréquemment son axe sous des angles aigus et obtus, et alors on n'a pas les pôles eux-mêmes, mais des places qui en sont voisines et qui sont limitées souvent par des arêtes ou des angles où s'accumule l'électricité développée aux pôles; il en résulte que bien souvent les points où l'indication de l'électroscope fait découvrir le plus d'électricité ne sont qu'une place favorable à l'accumulation de l'électricité, et qui est souvent très-voisine du pôle électrique, et non ce pôle lui-même. Quelquefois des déformations et des fissures dues à l'altération du cristal deviennent l'origine d'une distribution particulière de l'électricité, qui pourrait donner lieu à des erreurs sur la place des pôles et de l'axe. Ainsi, à moins qu'on ne trouve par hasard des faces perpendiculaires à cet axe, il faut, pour déterminer sa position, recourir à des mesures cristallographiques ou optiques.

La tourmaline n'est pas le seul cristal pyro-électrique. Déjà Canton avait trouvé la même propriété dans la topaze du Brésil, Brard dans l'axinite; Hauy dans la boracite, la scolézite, la titanite, etc.; Brewster dans la mésolite, le quartz et quelques cristaux artificiels. Les phénomènes électriques se manifestent d'une manière à peu près semblable dans tous ces cristaux; aussi leur étude détaillée n'offrirait aucun intérêt, s'il n'existait pas une liaison remarquable entre la forme des cristaux et leur polarité électrique. Hauy, le premier, l'avait signalée; il avait remarqué que les substances minérales cristallisées qui présentent les phénomènes pyro-électriques sont celles dont les cristaux dérogent à la loi de symétrie, c'est-à-dire dont les

parties opposées correspondantes ne sont pas semblables par le nombre, la disposition et la figure de leurs faces, le sommet qui est le plus chargé de facettes étant celui qui donne l'électricité positive par refroidissement. Cette observation a été plus tard confirmée et étudiée par Köhler, par Hankel, par Rose et par Riess. Tous les cristaux pyro-électriques ont pour leurs faces polaires une forme qui est due à la combinaison d'une forme homo-édrique avec une forme hémi-édrique. On sait que les formes *homo-édrique* et *hémi-édrique* résultent elles-mêmes de la combinaison de deux formes simples, de telle manière que pour la première toutes les faces de l'une des formes sont combinées avec toutes celles de l'autre, tandis que pour la seconde il manque la moitié des faces de l'une des formes. On en a un exemple bien simple dans la combinaison du cube avec l'octaëdre; dans l'état homo-édrique cette combinaison présente un cube dont les huit angles sont tronqués, tandis que dans son état hémi-édrique elle représente un cube dont quatre angles seulement sont tronqués, alternant avec des angles parfaits. Or, dans ce cas-ci, la combinaison de la forme homo-édrique avec la forme hémi-édrique, qui produit la face polaire d'un cristal pyro-électrique, engendre un tétraëdre par la réunion des quatre faces qui ont remplacé les angles du cube. Mais s'il est nécessaire, pour qu'un cristal soit pyro-électrique qu'il ait des formes polaires hémi-édriques, il ne suit pas de là nécessairement que tous ceux qui ont ces formes soient pyro-lectriques.

Quand on veut étudier la pyro-électricité de cristaux divers qui n'ont pas tous, comme la tourmaline peut l'avoir, une forme allongée, on ne peut employer le procédé de Becquerel décrit plus haut (fig. 265); on se sert alors avec avantage d'un électroscope à piles sèches muni d'une feuille d'or qui est portée par une tige en forme de cône tronqué dont la surface supérieure reçoit la face électrique du cristal. Il faut faire très-attention d'éviter tout frottement en posant le cristal, car sans cela on obtient souvent des signes négatifs qui sont dus au frottement de ses faces. On prend le cristal avec une pince doublée de liége qu'il faut revêtir d'une feuille d'étain pour

l'empêcher de conserver de l'électricité. Pour percevoir les signes électriques qui accompagnent le refroidissement du cristal, on a soin de le faire chauffer dans un creuset de porcelaine rempli de grenaille de plomb aussi fine que possible qu'on met en communication avec le sol par un conducteur, afin de faire disparaître l'électricité produite par le réchauffement qui pourrait rester adhérente à la surface du cristal. On le laisse plongé dans la grenaille plus ou moins de temps, suivant sa masse, pour qu'il prenne la température indiquée par un thermomètre qui y est aussi placé. Afin de faire disparaître l'électricité qui peut se développer sur sa surface par le frottement que lui fait éprouver la grenaille au moment où on l'en retire, il faut avoir soin de le faire passer rapidement à travers une flamme d'alcool.

En général, les expériences se font mieux en observant l'électricité qui se dégage pendant le refroidissement que celle qui résulte du réchauffement, vu que le réchauffement ne peut jamais s'opérer avec autant de régularité que le refroidissement; toutefois, on peut contrôler les résultats obtenus en chauffant avec une lampe à alcool l'une des extrémités du cristal pendant que l'autre est en communication avec l'électroscope. Mais on ne peut pas ainsi déterminer la position des pôles électriques; seulement on s'assure de la nature de leur électricité.

Si nous appliquons maintenant les procédés expérimentaux que nous venons de décrire à l'étude de la pyro-électricité des divers cristaux, nous trouvons des résultats intéressants dont nous nous bornerons à signaler les plus importants.

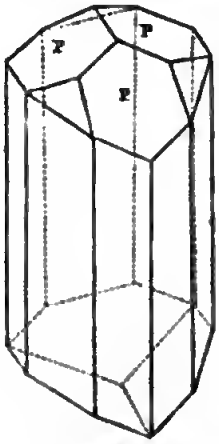


Fig. 266.

La tourmaline affecte le plus souvent la forme d'un prisme à neuf côtés (fig. 266); produit soit par un prisme à trois côtés, dont les arêtes ont deux petites faces, ou un prisme à six côtés, dont trois arêtes sont remplacées chacune par une face. Les extrémités du prisme sont formées par

trois faces du rhomboèdre principal, ou simplement par les faces du prisme fondamental à trois pans. Les faces du rhomboèdre principal reposent à l'une des extrémités du cristal sur les faces, et à l'autre extrémité sur les arêtes du prisme à trois côtés ; la première de ces extrémités est le pôle électrique *analogue*, la seconde le pôle *antilogue ;* les arêtes latérales du prisme représentent la direction de l'axe. Quelquefois le rhomboèdre principal manque, mais on peut apprécier sa position d'après les autres faces terminales. L'intensité de l'électricité dans les mêmes conditions de température varie avec chaque échantillon de cristal ; elle est plus grande en général dans les tourmalines à couleurs claires, à masse pure et transparente ; cependant on trouve quelquefois des tourmalines très-électriques parmi celles qui sont noires et non transparentes. Les dimensions du cristal influent aussi sur l'énergie de ses propriétés électriques, les plus épais et les plus longs étant ceux où cette énergie est la plus grande [1]. La tourmaline ne donne en général que des effets électrostatiques ; toutefois Du Bois-Reymond a réussi à obtenir un courant électrique en serrant entre deux lames de platine communiquant avec les bouts du fil d'un galvanomètre, les deux pôles d'une tourmaline noire de 25 millimètres de longueur sur 7 millimètres d'épaisseur, qu'il chauffait avec une flamme d'alcool ; la déviation du galvanomètre avait lieu en sens contraire quand, au lieu de chauffer la tourmaline, on la refroidissait en l'humectant avec de l'éther sulfurique. Le courant partait du pôle analogue pendant le réchauffement, et du pôle antilogue pendant le refroidissement. Il est probable que cette tourmaline était d'une nature plus conductrice, ce qui arrive dans les tourmalines opaques qui renferment quelques oxydes métalliques dont la présence est probablement aussi la cause de leur aptitude moindre à se charger d'électricité statique.

[1] Toutefois M. Becquerel a remarqué que des fragments obtenus par la rupture d'une tourmaline un peu longue, mais mince, sont plus fortement électriques que la tourmaline entière ne l'était. Il a même trouvé une tourmaline qui, n'étant point électrique, a donné, en étant partagée en deux, des fragments qui ont manifesté des signes prononcés d'électricité.

M. Forbes, qui a fait un grand nombre d'expériences sur ce sujet, a trouvé un cristal de tourmaline dont la structure paraissait régulière à la vue, mais qui jouissait de la propriété extraordinaire de présenter, en se refroidissant, un pôle d'électricité positive à chacune de ses extrémités. Mais il a observé que la portion centrale du cristal possédait un excès d'électricité négative. Tout porte à croire que ce cristal était une macle, c'est-à-dire un cristal formé de deux autres accolés par les faces symétriques qui possèdent par conséquent la même polarité électrique. M. Forbes, dans les nombreux échantillons qu'il a examinés, a trouvé, contrairement à M. Becquerel, qu'en général les morceaux de tourmaline les plus longs sont ceux qui donnent les signes électriques les plus intenses, à section égale; mais il ne paraît pas exister de rapport entre la longueur et l'intensité.

Le *silicate de zinc* est un des cristaux les plus parfaitement électriques; le plus léger changement de température suffit pour rendre son électricité sensible. Son pôle analogue est le seul qui soit parfaitement cristallisé, le pôle antilogue est en général tronqué et présente très-rarement les faces naturelles, vu que l'accroissement du cristal s'opère par cette extrémité. Du reste, les deux extrémités polaires, comme dans tous les cristaux électriques, ont une cristallisation différente. La forme primitive du silicate de zinc est un octaèdre rectangulaire, mais il se présente en prismes hexaèdres à sommets dièdres.

La *scolézite* (silicate de chaux et d'alumine [1]) se présente sous la forme de cristaux groupés ensemble de manière à ne posséder qu'une seule extrémité cristallisée régulièrement, laquelle est pyro-électrique et forme le pôle antilogue, tandis que le

[1] Composition de la scolézite :

Silice.	46,25
Alumine.	24,82
Chaux.	14,20
Soude.	0,39
Eau.	13,64
	99,80

pôle analogue serait à l'extrémité engagée et où convergent les ramifications; mais le faisceau cristallisé se résout le plus souvent au point de convergence en une masse fibreuse serrée qui n'est pas électrique et qui ne le devient que là où l'on peut distinguer des aiguilles cristallines nettement formées; son axe électrique se confond avec son axe cristallin. La scolézite qui est très-facilement électrisable, l'est encore, comme M. Brewster l'a remarqué, quand même la chaleur en lui enlevant son eau de cristallisation l'a convertie en une poussière blanche, ce qui prouve que c'est aux particules seules des cristaux et non à leur masse, qu'appartient la pyro-électricité. Il arrive souvent que les cristaux de la scolézite étant maclés, les extrémités qui ont des pôles opposés sont réunies et qu'il n'y a pas développement sensible d'électricité par la chaleur; mais si on enlève par le polissage l'un des cristaux qui forment la macle, l'autre est toujours électrique.

L'*axinite* (silicate de chaux et d'alumine [1]) est faiblement électrique; il faut la chauffer jusqu'à 120° pour avoir des signes d'électricité, et certains échantillons même très-bien cristallisés quelquefois n'en donnent point. En général les pôles antilogues sont plus énergiques que les analogues; il semblerait que l'axinite est formée de deux cristaux dans lesquels les axes électriques ont une direction opposée.

La *boracite* (magnésie boratée) est fortement électrique; elle a quatre axes électriques; les quatre pôles antilogues sont sur les faces brillantes du tétraèdre et les quatre pôles analogues

[1] L'axinite contient moins d'alumine et plus de chaux que la scolézite. Voici sa composition :

Silice.	43,686
Alumine.	15,630
Chaux.	20,670
Oxyde ferrique. . . .	9,450
Oxyde manganique. . .	3,050
Magnésie.	1,700
Potasse.	0,640
Acide borique. . . .	5,610
	100,456

sur les angles du cube, car la boracite se présente à nous sous la forme d'un cube modifié la plupart du temps sur les arêtes et sur les angles solides, de telle sorte que ces derniers dérogent complétement à la loi de symétrie. Réduite en poudre la boracite est encore électrique, quoiqu'on ne puisse découvrir au microscope de formes cristallines dans les grains de poussière qu'elle forme. La boracite semble présenter une exception à la loi générale que les électricités opposées ne se manifestent au même pôle qu'autant qu'il y a inversion dans la marche de la température. En effet en chauffant de la boracite dans de la grenaille de plomb avec toutes les précautions possibles, on voit le pôle antilogue, par exemple, donner constamment de l'électricité négative avec une température ascendante jusqu'à 204°, puis en donner de la positive de 204 à 256°; avec une température descendante il donne de la négative de 238° à 212°, et revient à son état normal en donnant de la positive au-dessous de 212°. Cette exception n'est probablement qu'apparente, vu qu'elle se manifeste d'autant plus facilement que la masse du cristal est moins homogène. Une différence dans la structure de l'enveloppe du cristal et dans celle de son noyau est nécessairement accompagnée d'une différence dans la conductibilité pour la chaleur et dans le développement de l'électricité de chacune des deux parties. Dès qu'on sort la boracite du creuset où elle a été chauffée pour l'exposer à l'air, la surface est facilement refroidie et recouvre un noyau encore chaud, de sorte que l'électroscope doit indiquer la différence entre deux électricités opposées, savoir celle de l'enveloppe qui reçoit la chaleur du noyau central et celle de ce noyau qui se refroidit. L'électricité négative provient du noyau; aussi pour que l'électricité qui vient de l'enveloppe l'emporte, il faut chauffer celle-ci très-fortement. Il peut arriver que l'électroscope ne manifeste point d'électricité comme cela a lieu aussi après le plus fort échauffement pour la tourmaline, l'axinite et la topaze, ce qui tient, dans tous ces cristaux également, à ce que l'électricité du noyau est dissimulée au commencement par celle de l'enveloppe qui est de nature contraire. Or, il se trouve que cette dernière peut l'emporter sur la première dans la boracite, à cause

de la structure particulière du cristal et de sa facilité à devenir électrique.

La *rhodizite* ressemble beaucoup à la boracite quant à sa forme et à sa manière d'être sous le rapport électrique; aussi nous ne nous en occuperons pas.

La *prehnite* (silicate de chaux et d'alumine [1]) présente dans sa pyro-électricité un caractère particulier, c'est que ses deux axes électriques sont tournés l'un vers l'autre de telle manière que les pôles analogues se confondent en un seul, tandis que les antilogues sont distincts, ce qui fait que le cristal est tripolaire. Ainsi la petite diagonale de la base donne la direction des deux axes dont le pôle analogue commun est au milieu de cette ligne, tandis que les deux pôles antilogues sont à ses extrémités, et cela a lieu pour toute la masse du cristal. Il en résulte que les arêtes latérales de la base tronquée possèdent l'électricité antilogue dans toute leur étendue, tandis que l'électricité analogue se trouve au milieu de la face. On nomme *centraux-polaires* les cristaux dont les pôles électriques sont ainsi disposés.

La *topaze* (fluosilicate d'alumine [2]) est un cristal du même genre; elle possède aussi deux axes électriques dans la direction de la diagonale la plus courte de la base du prisme.

[1] Voici sa composition, qui diffère notablement de celle de la scolézite et de l'axinite :

Silice.	44,10
Alumine.	24,26
Chaux.	26,43
Protoxyde de fer. . . .	0,74
Eau.	4,18
	99,71

Il y a quelques variétés qui renferment moins de chaux et plus de protoxyde de fer.

[2] Voici la composition de la topaze :

Silice.	34,36
Alumine.	57,74
Acide fluorique.	7,77
	99,87

Les deux pôles analogues sont au milieu de la courte diagonale, les deux pôles antilogues sont dans les arêtes latérales tronquées. Une topaze qui aurait une forme complète, c'est-à-dire celle d'un prisme à quatre faces avec des extrémités pointues à quatre pans, ne serait point électrique à ses deux extrémités, mais l'électricité antilogue se présenterait sur les arêtes latérales tronquées dans toute leur étendue et de là diminuerait rapidement sur les faces latérales, et disparaîtrait vers les arêtes latérales vives ainsi que sur ces arêtes mêmes. Il n'y aurait point d'électricité analogue sur toute la surface du cristal; elle serait toute intérieurement. Mais en fait les topazes s'écartent beaucoup de ce caractère normal. En altérant une arête latérale vive on provoque la présence de l'électricité analogue; les arêtes terminales mêmes reçoivent de l'électricité des points électriques qui en sont le plus rapprochés, et la pointe terminale quand elle est tronquée, ce qui est le cas ordinaire, dégage une faible électricité analogue. Il résulte de là, que la distribution des électricités analogue et antilogue est singulièrement modifiée dans la topaze, soit par des irrégularités naturelles dans son état cristallin, soit par celles que déterminent des ruptures artificielles.

M. Forbes, qui a étudié la pyro-électricité de la topaze et de la boracite, a trouvé, comme l'avait déjà remarqué M. Becquerel, que l'intensité de l'électricité atteint son maximum quand la vitesse du refroidissement est devenue comparativement plus faible. Il a observé en particulier que la topaze possède la propriété de conserver son électricité longtemps après que la température a cessé d'éprouver des changements. Cet effet dépend uniquement de la conductibilité de la pierre, car on conçoit très-bien qu'il puisse se faire que le cristal devenant moins conducteur à mesure que la chaleur diminue, la recomposition des deux électricités mette plus de temps à s'effectuer. Ainsi ayant obtenu une déviation de 115° de l'aiguille de l'électromètre de torsion de Coulomb, en lui présentant un cristal de tourmaline peu d'instants après qu'il était devenu électrique par la chaleur, au bout de 20″ la déviation était à peine diminuée; au bout de 40″, elle était encore

de 95° et au bout de 60″, de 85°. Après plusieurs heures le métal était encore fortement électrique. M. Forbes a obtenu des résultats semblables avec plusieurs autres cristaux; il lui paraissait, d'après ses recherches, que dans tous les minéraux la difficulté qu'éprouvent les deux électricités à se séparer, et par conséquent à se recombiner, augmente avec leur masse; de là résulte que des cristaux minces sont plus facilement électriques par la chaleur, mais le demeurent moins longtemps.

La *titanite*, le *spath pesant* et le *cristal de roche* donnent dans quelques cas des signes de pyro-électricité; mais ces signes sont peu réguliers, et on n'a pas encore réussi à déterminer les axes électriques de ces cristaux.

Un très-grand nombre de cristaux, outre ceux dont nous avons parlé, ont été examinés avec soin par MM. Rose et Riess et n'ont manifesté aucune trace de pyro-électricité; mais ces résultats négatifs ne sont pas complétement concluants. En effet, on trouve souvent parmi les cristaux pyro-électriques des échantillons qui ne le sont pas, soit par l'effet de quelque cause qui augmente leur conductibilité intérieure, soit par un mode de groupement de leurs molécules intégrantes qui dissimule l'état électrique que développe dans ces molécules le mouvement de la chaleur. Il peut donc arriver que parmi les cristaux qui jusqu'ici n'ont pas paru pyro-électriques, on trouve des échantillons qui soient de nature à l'être.

Indépendamment des cristaux naturels, il s'en trouve plusieurs d'artificiels qui sont aussi pyro-électriques; l'un des principaux est la *struvite* qui est un phosphate ammoniacal de magnésie formé par la décomposition prolongée de matières animales. La struvite est un prisme rhomboédrique vertical, terminé à l'une de ses extrémités par une surface plane, et à l'autre par les faces d'un prisme transversal. Elle a un seul axe électrique qui est dans la direction du prisme vertical; le pôle analogue est à la face terminale droite et le pôle antilogue est à l'arête du prisme transversal de l'autre face. Le cristal devient facilement électrique; la chaleur de la main suffit pour rendre sensible l'électricité de ses deux pôles.

Outre le cristal que nous venons de nommer, trois autres

également artificiels parmi tous ceux que Brewster a étudiés, ont été reconnus généralement comme pyro-électriques; ce sont le *sucre* et les deux *acides racémiques*. Il faut avoir soin de ne pas prendre l'acide racémique ordinaire, car il est très-peu pyro-électrique, tandis que l'acide uvique qui sous le rapport chimique lui est semblable, l'est très-fortement. Cela tient à ce que, comme M. Pasteur l'a démontré, l'acide racémique est formé de deux acides chimiquement identiques, mais qui sont dissymétriques sous le rapport moléculaire, l'un faisant tourner le plan de polarisation à droite, et l'autre le faisant tourner à gauche. Or ces deux acides, dont le premier est identique à l'acide uvique, sont également doués d'une très-forte pyro-électricité; ils ont un seul axe électrique dans la courte diagonale de la base du prisme.

En résumé il résulte de l'étude détaillée que nous venons de faire de la pyro-électricité des cristaux, que ce phénomène est probablement beaucoup plus général qu'on ne le croit, mais qu'il n'a lieu qu'autant que la substance est à l'état cristallin et qu'il exige pour se manifester une dissymétrie dans cet état; ajoutons que la propriété qui donne naissance au phénomène appartient non à la masse, mais à chaque molécule du cristal, qu'elle est due très-probablement à la manière dont les atomes sont groupés pour former la molécule intégrante et à la rupture de l'équilibre électrique qu'entraîne dans cette molécule le mouvement de la chaleur.

M. Becquerel estime aussi qu'il s'opère par la chaleur dans les cristaux une dilatation qui sépare les plans de clivage, ce qui produit un dégagement d'électricité analogue à celui qui a lieu dans le clivage, comme nous le verrons dans le chapitre suivant. En effet, quand on clive une topaze dans le sens perpendiculaire à l'axe, les deux faces séparées se trouvent dans deux états électriques différents, de sorte qu'on peut concevoir la chaleur comme opérant une espèce de clivage et libérant les deux électricités qui semblaient être dissimulées avant la rupture.

Nous reviendrons du reste, après avoir étudié les effets électriques de la chaleur dans les corps conducteurs, sur cette

influence remarquable de l'arrangement des particules dans les phénomènes pyro- et thermo-électriques.

§ 2. Dégagement d'électricité par l'action calorifique dans les corps bons conducteurs. — Courants thermo-électriques.

M. Seebeck découvrit en 1823 qu'on peut déterminer un courant électrique dans un circuit tout métallique uniquement en établissant une différence de température entre un point de ce circuit et les autres. La première expérience fut faite en formant, au moyen d'un barreau de bismuth *o s* d'une lame de cuivre *s c s* soudés bout à bout, une espèce d'arc (fig. 267), dans l'intérieur duquel une aiguille aimantée *a b* reposait par sa chape sur une pointe. L'appareil étant placé dans la direction du méridien magnétique pour que l'aiguille librement suspendue fût bien parallèle aux deux pièces métalliques entre lesquelles elle était placée, il suffisait de chauffer légèrement avec une lampe à alcool l'un des deux points de soudure, pour obtenir dans tout le circuit un courant électrique dont la présence était accusée par une déviation prononcée de l'aiguille. Le sens de la déviation et par conséquent du courant changeait suivant que c'était l'une ou l'autre des deux soudures qui était chauffée; il changeait également quand au lieu de chauffer, on refroidissait la même soudure. Il est donc nécessaire d'établir une différence de température entre les deux soudures pour qu'il y ait courant; si elles sont exactement à la même température il n'y a pas d'effet.

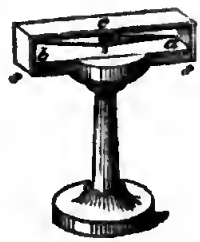


Fig. 267.

Seebeck donne le nom de *thermo-électrique* à ce courant et au couple qui l'engendre pour le distinguer du courant et du couple *hydro-électriques* autrement appelés courant et couple voltaïques.

Seebeck remarque encore qu'en remplaçant le barreau de bismuth par un barreau d'antimoine, mais en ayant soin de laisser toujours la lame de cuivre, le sens du courant devient

inverse dans les mêmes circonstances de ce qu'il était dans le premier cas; ainsi avec cuivre et bismuth, le courant est dirigé du bismuth au cuivre à travers le point chauffé et par conséquent du cuivre au bismuth à travers le point non chauffé; et avec cuivre et antimoine il est dirigé du cuivre à l'antimoine dans la partie chauffée et de l'antimoine au cuivre dans la partie non chauffée. Aussi pour obtenir l'effet le plus grand, il faut former le couple thermo-électrique d'une barre de bismuth (fig. 268) en forme d'arc *scs'* dont les deux extrémités viennent reposer sur les deux extrémités d'un barreau d'antimoine *ss'*; on substitue à l'aiguille du premier appareil une aiguille astatique dont l'axe passe librement à travers une ouverture faite au milieu de la lame de bismuth; il suffit, quand on a disposé l'appareil dans le méridien magnétique, de pincer entre ses doigts les deux métaux à l'un de leurs points de contact pour déterminer entre ce point et l'autre une différence de température capable de faire dévier l'aiguille de plusieurs degrés.

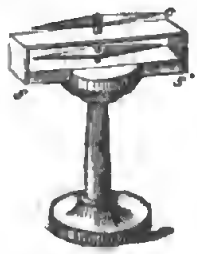


Fig. 268.

Seebeck parvint encore à produire des courants thermo-électriques en composant les deux parties du couple d'un même métal, mais il ne réussit qu'avec des métaux qui ont une texture cristalline bien prononcée, ce qui établit une différence d'homogénéité entre leurs différentes parties, ou avec deux portions du même métal rendues hétérogènes directement, tels que deux morceaux d'acier, l'un doux, l'autre trempé.

Reprenant cette dernière partie des recherches de Seebeck, divers physiciens parvinrent à produire des courants thermo-électriques dans les corps homogènes. Yelin montra qu'il suffit de chauffer l'une des extrémités d'un barreau de bismuth pour agir sur une aiguille aimantée, en le plaçant parallèlement au-dessus ou au-dessous de cette aiguille : le sens de la déviation varie suivant qu'on approche de l'aiguille l'extrémité chaude ou froide du barreau de bismuth; on obtient les mêmes résultats pour chacune des extrémités du barreau quand on le chauffe à son milieu et que l'on maintient ses extrémités froides.

Yelin a encore reconnu que l'action thermo-électrique des barreaux métalliques dépend de la forme que leur a donnée la fonte et de la manière dont ils ont été refroidis dans leurs différentes parties, ce qui laisse entrevoir une relation entre la cristallisation, ou généralement entre la constitution moléculaire des métaux et ce genre de propriétés. Il est évident que la différence de température entre les divers points de ces grosses masses métalliques détermine la production de courants sur leur surface, qui agissent sur l'aiguille d'une manière analogue aux courants d'induction que produit sur un disque ou sur une tige métallique l'approche d'un aimant. Seulement les courants thermo-électriques ne sont pas instantanés comme ceux d'induction. Quant à la direction de ces courants électriques, elle est liée évidemment avec le sens de la propagation de la chaleur et avec la forme et la texture intérieure des métaux soumis à l'expérience.

M. Sturgeon a obtenu des résultats plus précis avec des barreaux cylindriques et coniques, soit de bismuth, soit d'antimoine; les courants étaient, en général, dirigés de la partie chaude à la partie froide, du moins dans les cônes dont on réchauffait ou refroidissait la base. Dans les cylindres, la distribution des courants était assez régulière : en chauffant uniformément l'une des extrémités d'un cylindre d'antimoine, on trouvait deux lignes neutres déterminées sur la surface par un plan passant par l'axe du cylindre et des courants dirigés le long d'autres génératrices du cylindre. M. Sturgeon a fait également un grand nombre d'expériences sur des rectangles et des anneaux métalliques homogènes; mais avant de les exposer, nous devons parler des résultats importants qu'avait obtenus M. Becquerel longtemps auparavant.

Le procédé de M. Becquerel est tout différent de ceux mis en usage par Seebeck et par les physiciens dont nous avons parlé. Il opérait au moyen du multiplicateur, en ayant soin de se servir d'un multiplicateur à fil gros et court, afin que les courants thermo-électriques, produits dans un circuit tout métallique, ne rencontrassent pas une résistance trop grande dans leur trajet à travers le fil de l'instrument. Ayant tourné en spirale

les deux bouts du fil de cuivre du multiplicateur, il montra qu'il suffisait pour engendrer un courant de chauffer l'un de ces bouts à une lampe à alcool et de le toucher avec l'autre demeuré froid; en séparant les deux spirales et en renouvelant le contact à chaque oscillation de l'aiguille de l'instrument, on obtenait des déviations très-considérables. Des fils de platine et d'argent donnent naissance au même phénomène que le fil de cuivre, à l'intensité près, qui varie avec le métal employé: ainsi, avec le platine, l'une des spirales doit être portée au rouge cerise, l'autre restant à la température ordinaire, tandis qu'avec le fil de cuivre il n'est pas nécessaire de chauffer au delà du rouge naissant pour obtenir un courant très-sensible. M. Becquerel, dans ses premières expériences, avait construit, avec chacun des fils soumis à l'expérience, un galvanomètre multiplicateur complet, mais cela n'est pas nécessaire ; il suffit de fixer à chacune des extrémités du fil de cuivre d'un galvanomètre ordinaire un bout du fil sur lequel on veut opérer, en ayant soin de prendre ces deux bouts assez longs pour que la chaleur ne puisse pas se propager d'une manière sensible jusqu'au point où ils sont en contact avec le fil du galvanomètre. Ajoutons que dans les expériences qui précèdent le courant était dirigé de l'extrémité chauffée à l'extrémité demeurée froide à travers leur point de contact, et par conséquent de la froide à la chaude à travers le fil du galvanomètre.

Il semblerait, d'après ce qui précède, qu'il suffirait de réunir par un fil métallique les deux bouts d'un galvanomètre, et de chauffer ce fil en un point quelconque de sa longueur pour avoir un courant électrique. Or, M. Becquerel a remarqué que, quelle que soit la nature du fil conjonctif, on n'obtient aucun effet en opérant ainsi, du moins si le fil est assez long et le point

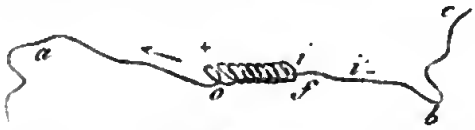


Fig. 269.

chauffé assez distant pour que la chaleur ne parvienne pas jusqu'à ses points de contact avec le fil du galvanomètre. Mais si,

sans troubler l'homogénéité d'un fil de platine *abc* (fig. 269), on fait un nœud, ou, mieux encore, si on le tourne en spirale en *o* dans une partie de sa longueur, tout en n'établissant point de discontinuité, et qu'on applique le foyer de chaleur à peu de distance de cette spirale, on obtient un courant continu dirigé du côté du renflement à partir du point chauffé, ce qui tient probablement à ce que la petite masse se réchauffe aux dépens de la chaleur transmise par la portion *fi* du fil qui la sépare du foyer. Il est bien évident que si l'on prend une distance $fi = fi'$, en *i* et *i'* le mouvement de la chaleur ne peut pas être le même à cause de la masse *o*, et le courant doit provenir de la différence de ces deux mouvements. Le palladium se comporte comme le platine : un fil d'or ne produit aucun effet ; un fil d'argent n'en produit qu'un très-faible, ainsi qu'un fil de cuivre. On peut toutefois obtenir un courant continu en unissant les extrémités du galvanomètre avec un fil de cuivre qu'on coupe en deux, et dont on réunit les deux bouts libres au moyen de deux crochets passés l'un dans l'autre (fig. 270). On place la lampe à alcool à droite ou à gauche du point de jonction en *o* par exemple, et on a un courant qui suit la direction *abc*, ce qui tient probablement à ce que la propagation de la chaleur se fait moins facilement dans ce sens que dans l'autre. Cette explication paraît d'autant plus plausible que l'oxydation du fil de cuivre au point de jonction des deux bouts, qui est une conséquence de la chaleur qui y arrive, augmente l'intensité du courant en diminuant la facilité de la propagation de la chaleur dans cette partie du circuit.

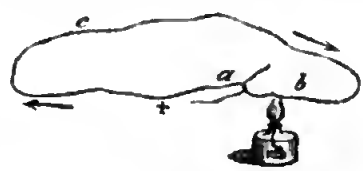


Fig. 270.

Conduit par ces expériences, et d'autres du même genre,

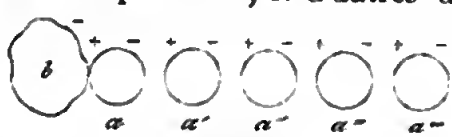


Fig. 271.

M. Becquerel admet comme principe fondamental que la propagation de la chaleur dans un métal, dans un fil métallique

a a' a'' a''' (fig. 271) par exemple, est toujours accompagnée d'un dégagement d'électricité, dégagement qui consiste en ce que la première particule *a*, qui est en contact avec une source de chaleur *b*, prend à cette source l'électricité positive, lui laissant la négative ; qu'à son tour, la seconde particule *a'*, en s'échauffant, prend de même l'électricité positive à la première, jusqu'à la dernière *a'''*, qui se trouve ainsi chargée d'électricité positive. Cette propagation se fait naturellement au moyen de la polarisation électrique des particules successives, et par une suite de décompositions et de recompositions des électricités contraires de ces particules consécutives, tellement qu'il n'y a d'électricité libre qu'aux deux extrémités ; aussi, si l'on touche le bout incandescent, c'est-à-dire la particule *a* avec un corps conducteur assez volumineux pour qu'il ne s'échauffe pas sensiblement, on lui enlève son électricité positive, la négative de *a* prend la positive de *a''*, et ainsi de suite jusqu'à la particule *a'''*, qui se trouve ne garder que la négative.

M. Becquerel a essayé de prouver directement ce principe au moyen de l'expérience suivante. Il introduit un fil de platine *a b* (fig. 272) dans un tube de verre fermé à la lampe par l'une de ses extrémités, et fait communiquer le bout libre du

Fig. 272.

fil avec le plateau d'un condensateur, puis il enroule autour du bout fermé du tube un autre fil de platine *a' b'*, dont l'extrémité libre communique avec le sol ; il chauffe fortement le bout du tube, et alors le fil intérieur transmet au condensateur une charge très-sensible d'électricité positive.

Pour expliquer cette production d'électricité, M. Becquerel remarque que le tube de verre devenant conducteur à raison de sa température élevée, l'électricité positive du fil extérieur traverse le verre et est conduite au condensateur par le fil intérieur ; celui-ci devrait, il est vrai, produire un effet inverse, mais étant moins chauffé, l'effet du premier auquel la flamme

de la lampe est appliquée directement l'emporte sur celui du second; si les deux fils étaient également chauffés, il n'y aurait point d'effet du tout. Remarquons que l'électricité négative du fil extérieur se porte à son extrémité froide, et de là dans le sol, avec lequel elle communique.

L'interprétation que nous venons de donner de l'expérience de M. Becquerel est sujette à bien des objections. M. Gaugain a fait voir que l'emploi de la lampe à alcool peut donner naissance à des courants électro-chimiques; et, en supposant qu'on réussisse, comme l'a fait M. Leroux, à éviter la production de ces courants, on ne peut pas se mettre à l'abri de l'électricité qui peut provenir de l'action sur le platine du verre fondu ou du moins chauffé. Quoi qu'il en soit, partant du principe que la propagation de la chaleur est accompagnée d'un dégagement d'électricité dans chaque métal, M. Becquerel en conclut que lorsqu'on chauffe, dans un point quelconque de sa longueur, un fil parfaitement homogène qui réunit les deux bouts d'un galvanomètre, il doit s'établir à partir du point chauffé deux courants parfaitement égaux cheminant l'un à sa droite, l'autre à sa gauche, et revenant à leur point de départ après avoir traversé le galvanomètre; ces deux courants égaux étant dirigés en sens contraires, leur action doit être nulle, ainsi que l'expérience le démontre. Mais pour peu que l'homogénéité des deux fils soit troublée d'un côté ou de l'autre, il en résulte que l'un des deux courants thermo-électriques devient plus fort ou plus faible que l'autre, et leur différence est accusée par la déviation du galvanomètre. Il suffit de bien peu de chose pour troubler cette homogénéité; suivant M. Becquerel, une simple augmentation de masse, même très-légère, est suffisante; une différence dans l'état moléculaire, une faible altération dans la pureté chimique, suffit également. M. Becquerel attribue l'influence de la non homogénéité à ce qu'elle détermine une différence dans la manière dont la chaleur se propage; différence qui, suivant lui, suffit pour en établir une entre les deux courants. Nous verrons plus loin que c'est dans la non homogénéité elle-même, et non dans l'influence qu'elle exerce sur la propagation de la chaleur, qu'il faut chercher la cause qui fait

que l'un des courants est plus fort ou plus faible que l'autre.

Mais de toutes les manières, la plus efficace pour détruire l'homogénéité, c'est de substituer au fil unique qui réunit les deux bouts du galvanomètre un fil composé de deux bouts de fil de nature différente, unis ensemble métalliquement. En chauffant leur point de contact, on obtient au galvanomètre un courant qui est la différence des courants que chacun d'eux séparément produirait, chaque fil étant à la fois conducteur du courant dégagé par l'autre. En d'autres termes, l'intensité d'un courant thermo-électrique est égale à la différence des actions thermo-électriques produites dans chaque métal par la même température, de sorte que si on appelle P *fer* le pouvoir thermo-électrique du fer, et P *cuivre* celui du cuivre, l'intensité du courant, lorsqu'on élève la soudure fer-cuivre à une certaine température, devra être égale à P *fer* — P *cuivre* ou à P *cuivre* — P *fer*, suivant que ce sera le pouvoir thermo-électrique du fer ou celui du cuivre qui sera le plus considérable. C'est dans le cas que nous venons d'indiquer que rentre l'expérience primitive de Seebeck du couple thermo-électrique bismuth et cuivre. M. Becquerel, en formant des couples semblables avec divers métaux, et en élevant la température de leur point de contact, a obtenu au galvanomètre des courants qui l'ont conduit à ranger ces métaux dans l'ordre suivant, quant à leurs propriétés thermo-électriques : *Bismuth*, *platine*, *plomb*, *étain*, *cuivre*, *or*, *argent*, *zinc*, *fer* et *antimoine*. Dans ce tableau, chaque métal est positif par rapport à celui qui le précède, c'est-à-dire que le platine, par exemple, prend l'électricité positive au bismuth, ce qui fait que le courant va du platine au bismuth à travers le fil du galvanomètre, du bismuth au platine à travers le point chauffé. Mais il est préférable de représenter le phénomène comme nous l'avons fait plus haut, c'est-à-dire en partant du principe que chacun des deux métaux chauffés à leur point de contact, donne naissance à un courant indépendant qui va pour chacun du point chauffé à l'extrémité froide, à travers l'autre métal. D'après cela, l'ordre des métaux dans le tableau ci-dessus serait celui de leur pouvoir thermo-électrique, et l'effet observé serait dû à la diffé-

rence d'intensité des pouvoirs thermo-électriques des deux métaux en contact.

Cet ordre diffère un peu, pour quelques-uns des métaux intermédiaires, de celui qui avait été établi par M. Yelin, et plus tard par M. Nobili; mais il y a plus : ces deux physiciens ont remarqué que dans quelques métaux, tels que l'antimoine en particulier, le pouvoir thermo-électrique est inverse de celui des autres; en d'autres termes, dans ces métaux le courant, au lieu d'être dirigé, comme dans tous les autres, de l'extrémité chauffée à la froide, à travers le circuit entier, est dirigé de la froide à la chaude; de sorte que, lorsque l'un d'eux forme un couple avec un autre métal de la série, les deux courants qui naissent du réchauffement du point de contact, au lieu de parcourir le fil du galvanomètre en sens contraires, le parcourent dans le même sens, et par conséquent s'ajoutent, ce qui rend les couples ainsi formés beaucoup plus puissants; c'est ce qui a lieu en particulier avec le couple bismuth et antimoine.

Une autre anomalie observée par M. Becquerel est le changement qu'éprouve le sens du courant dans quelques couples, quand on élève la température au delà d'une certaine limite. Ainsi, dans un circuit fer et cuivre, le courant va du cuivre au fer à travers le point chauffé tant que la température n'excède pas un certain degré, 300° environ; sous l'action d'une température plus élevée, le courant change de sens et va du fer au cuivre. Le même changement a lieu, mais à une température moins élevée, avec les couples zinc et argent et zinc et or; le courant qui allait, pour des températures peu élevées, de l'argent et de l'or au zinc, va, au delà de 100°, du zinc à l'argent et à l'or.

Voici maintenant comment M. Becquerel s'y prend pour déterminer le pouvoir thermo-électrique relatif de chaque métal. Pour rendre la comparaison entre les métaux possible, il fallait nécessairement les mettre dans les mêmes conditions, et par conséquent non-seulement les réduire en fils de même diamètre et de même longueur, mais aussi les placer tous dans le même circuit, afin de se mettre ainsi à l'abri des différences de conductibilité qui auraient influé sur l'intensité des courants,

indépendamment du pouvoir thermo-électrique. Dans ce but, M. Becquerel a soudé avec soin bout à bout huit fils de métaux

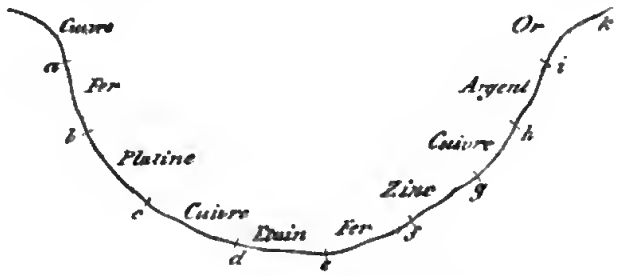


Fig. 273.

différents d'un demi-millimètre de diamètre et de deux décimètres de longueur, puis (fig. 273) il a mis cette chaîne en communication par ses extrémités avec les bouts du galvanomètre. Toutes les soudures étaient maintenues à 0°, excepté celle sur laquelle se faisait l'expérience, qu'on chauffait graduellement jusqu'à 20°; en opérant ainsi sur chacune des soudures successivement, on a obtenu les résultats suivants :

SOUDURES CHAUFFÉES.	DÉVIATIONS.	INTENSITÉ des COURANTS [1].
Fer — Étain.	36.50	31.24
Cuivre — Platine.	16.00	8.55
Fer — Cuivre.	34.50	27.96
Argent — Cuivre.	4.00	2
Fer — Argent.	33	16.20
Fer — Platine.	39	36.07
Cuivre — Étain.	7	3.50
Zinc — Cuivre.	2	1
Argent — Or.	1	0.50

[1] Ces intensités étaient conclues des déviations au moyen d'une table dressée empiriquement, qui donnait les rapports entre les grandeurs des déviations et les intensités correspondantes des courants.

Pour interpréter les résultats renfermés dans ce tableau, il faut se rappeler que, d'après ce que nous avons dit plus haut, l'intensité du courant de chaque couple est la différence entre

les intensités des courants auxquels chacun des deux métaux du couple donnerait naissance séparément, ou, ce qui revient au même, que les intensités portées au tableau représentent les différences des pouvoirs thermo-électriques des deux métaux qui composent le couple dont le point de contact est chauffé. Ce point important a été établi directement par M. Becquerel, au moyen de l'expérience suivante.

On se sert pour cela du circuit de la fig. 273, dans lequel le fer et le cuivre sont d'abord en contact au point *a*, et séparés partout ailleurs aux soudures *b* et *c*, *d* et *e*, *f* et *g* par des fils de platine, d'or et d'étain. On commence par porter la soudure *a* à 50°, tandis qu'on maintient à 0° toutes les autres; on observe alors l'intensité du courant; puis après on porte successivement à 50° les soudures *b* et *c*, *d* et *e*, *f* et *g*, en maintenant également toutes les autres à 0°. Dans ces différentes circonstances, les courants ont toujours la même intensité; de sorte que le fer et le cuivre, quand ils sont en contact ou séparés par d'autres métaux, donnent naissance à un courant dont l'intensité est la même; ce courant ne dépend, par conséquent, que de la température des deux points extrêmes.

Revenant au tableau ci-dessus, M. Becquerel en déduit le pouvoir thermo-électrique des métaux, en partant du principe que le métal qui prend l'électricité positive à l'autre, au point de contact, est celui dont le pouvoir thermo-électrique est le plus fort. Ainsi, dans le couple fer-cuivre, le courant va du fer au cuivre à travers le circuit tout entier, et par conséquent du cuivre au fer, à travers leur point de contact chauffé; c'est donc le fer qui prend l'électricité positive au cuivre, et il a (toujours suivant M. Becquerel) un pouvoir thermo-électrique plus fort. Or, suivant nous, ce devrait être l'inverse, car le courant thermo-électrique du fer doit aller de son extrémité chauffée à son extrémité froide, à travers le circuit tout entier, et celui du cuivre de même. Mais le courant définitif perçu par le galvanomètre cheminant dans le sens du courant du cuivre, cela indique que c'est ce dernier qui est le plus fort.

Quoi qu'il en soit, en raisonnant comme M. Becquerel, on a $27{,}96 = p$ fer $- p$ cuivre, et $36{,}07 = p$ fer $- p$ platine.

Si on retranche la première expression de la seconde on a : p cuivre — p platine = 8, 11 ; or, le tableau donne pour la valeur de cette expression, tirée directement de l'expérience, 8,55, nombre bien peu différent. De même p fer — p étain = 31,24, et p cuivre — p étain = 3,50 ; d'où p fer — p cuivre = 27,74 au lieu de 27,96 que donne l'expérience. Si donc on désigne par x la puissance thermo-électrique du fer à 20°, on aura :

p fer	$= x$
p argent	$= x - 26{,}20$
p or	$= x - 26{,}70$
p zinc	$= x - 26{,}96$
p cuivre	$= x - 27{,}96$
p étain	$= x - 34{,}24$
p platine	$= x - 36$

Le fer est positif par rapport à chacun des métaux de la série ; c'est donc, suivant M. Becquerel, son courant qui détermine le sens du courant qui résulte du couple thermo-électrique qu'il forme avec chacun des métaux ; il en résulte donc que son pouvoir thermo-électrique est supérieur à celui des autres métaux, et que par conséquent x est plus grand que 36. Quant à la valeur absolue de x, elle ne peut être déterminée qu'indirectement et par voie d'hypothèses. M. Becquerel remarque que, quand parmi les propriétés calorifiques on cherche celles qui sont sensiblement les mêmes pour les différents métaux, tels que l'or, l'argent et le zinc, qui ont le même pouvoir thermo-électrique, on ne voit guère que leurs pouvoirs rayonnants ; en effet, ce n'est ni le pouvoir conducteur, ni la chaleur spécifique. Si donc on suppose que les pouvoirs thermo-électriques soient proportionnels aux pouvoirs rayonnants, on peut, en comparant sous ces deux rapports le fer et l'or, dont les pouvoirs rayonnants sont comme 15 : 12, établir la proportion suivante :

$$x : x - 26{,}70 = 15 : 12$$

qui donne

$$x \text{ ou } p \text{ fer} = 133{,}50$$

On tire de là facilement les pouvoirs thermo-électriques des

autres métaux, et c'est ainsi qu'on a p argent $= 107,30$; p étain $= 102,26$, p platine $= 97,50$.

Mais, indépendamment de l'incertitude qui règne sur l'exactitude de l'hypothèse qui nous a donné la valeur de x, les puissances thermo-électriques, calculées comme nous venons de le faire, ne seraient vraies que dans les conditions de température et de conductibilité de circuit qui nous ont servi à les établir. M. Becquerel est parvenu à se débarrasser de ces deux éléments en remarquant que les intensités trouvées directement par l'expérience, et qui donnent la différence des pouvoirs thermo-électriques tels que p fer — p cuivre, sont proportionnelles au pouvoir conducteur du circuit et à la température, ce qu'il a vérifié directement par l'expérience en formant des circuits composés de deux métaux seulement, et en faisant varier la température entre certaines limites, sans cependant dépasser 50°. Partant de ces points acquis, il a pu représenter les pouvoirs thermo-électriques des métaux par des nombres indépendants à la fois de la conductibilité du circuit dont ils font partie, et de la quantité de chaleur qui s'y propage.

Si, comme nous le croyons, il faut renverser l'ordre des pouvoirs thermo-électriques, c'est-à-dire regarder comme ayant le pouvoir le plus fort celui des deux métaux soudés dans lequel le courant chemine de l'extrémité chauffée à l'extrémité froide à travers le circuit tout entier, on a dans le tableau qui donne les valeurs de p fer, p argent, etc.

$$p \text{ argent} = 26,20 - x$$
$$p \text{ or} = 26,70 - x$$

et ainsi de suite. Il faut alors admettre que les pouvoirs thermo-électriques ne sont plus directement mais inversément proportionnels aux pouvoirs rayonnants, et au lieu de la proportion :

$$x : x - 26,70 = 15 : 12$$

On a :

$$x : 26,70 - x = 12 : 15$$

D'où l'on tire :

$$x \text{ ou } p \text{ fer} = 12$$

Et par conséquent p argent $= 14,20$, p cuivre $= 14,70$, p étain $= 22,24$, p platine $= 24$.

Ainsi que nous venons de l'exposer, M. Becquerel, en liant la production des courants thermo-électriques à la propagation de la chaleur, considère la thermo-électricité comme un effet direct de la chaleur, modifié seulement par les conditions spéciales du corps qui transmet le flux calorifique. Les expériences, dans les limites où elles ont été faites, semblent favorables à cette opinion, et en tout cas elles démontrent, du moins pour les métaux qui en ont été l'objet et pour les températures auxquelles elles ont eu lieu, que le pouvoir thermo-électrique

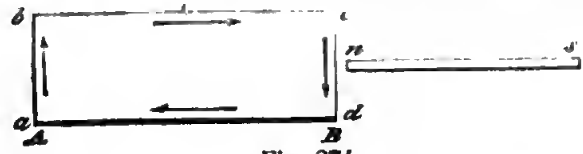


Fig. 274.

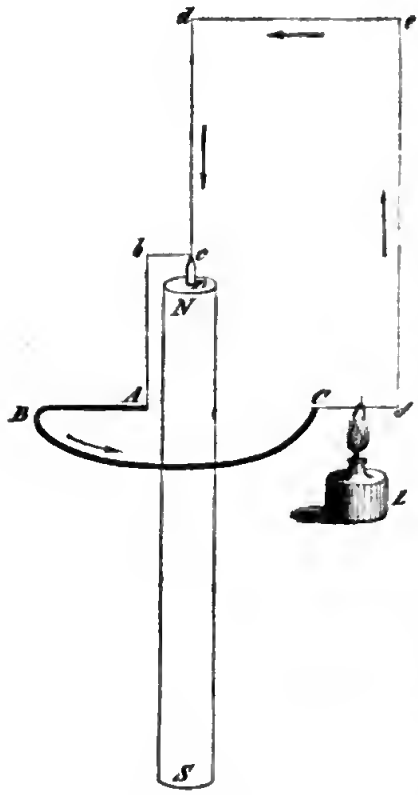


Fig. 275.

d'un couple est bien la différence des pouvoirs thermo-électriques des deux métaux dont il est formé ou leur somme, si ces pouvoirs thermo-électriques sont inverses l'un de l'autre, comme c'est le cas avec le couple bismuth et antimoine par exemple. Cette loi, simple et importante, n'est pas nécessairement liée à l'hypothèse qui attribue le développement du pouvoir thermo-électrique à la propagation de la chaleur; elle peut subsister, quelle que soit la cause de ce développement. Cherchons donc, par de nouveaux faits, à nous faire une idée exacte de cette cause.

Nous ne terminerons pas cependant ce paragraphe sans décrire encore deux appareils élégants de M. Cumming, fondés sur le développement des courants thermo-électriques. Le pre-

mier est un simple rectangle (fig. 274) dont les trois côtés, *ab*, *bc* et *cd*, sont formés de fils d'argent, et le quatrième, AB, d'un fil de platine. Ce rectangle est suspendu en *e*, de manière que le platine se trouve en bas. Si l'on chauffe l'un des points de jonction, tels que A, et qu'on présente à l'un des côtés, au côté *cd* par exemple, un aimant *ns*, on voit aussitôt le rectangle obéir à l'action attractive ou répulsive de l'aimant sur le courant qui circule en *cd*, de *c* en *d*. On peut suspendre le circuit métallique sur l'aimant lui-même (fig. 275), de manière à lui permettre, en contournant le fil de platine ABC, de tourner autour du pôle magnétique, ce qui a lieu en effet dès qu'on chauffe au moyen d'une lampe le point C, qui dans chaque révolution du circuit vient passer au-dessus de la flamme.

§ 3. Rapport entre la thermo-électricité et la structure moléculaire des corps.

L'influence qu'exerce la structure moléculaire des corps sur les phénomènes thermo-électriques, résulte déjà du fait que l'une des conditions nécessaires pour que la thermo-électricité se développe, c'est que le corps chauffé soit solide. Ainsi M. Matteucci est parvenu à démontrer que le contact du mercure chaud et du mercure froid ne produit point de courant thermo-électrique, que par conséquent, contrairement à l'opinion de plusieurs physiciens, le mercure ne peut devenir thermo-électrique. Il avait d'abord obtenu ce résultat négatif en ayant trois capsules consécutives pleines de mercure réunies par deux syphons remplis également de ce même liquide. On fait communiquer les deux extrêmes avec les bouts du fil du galvanomètre; puis, après avoir enlevé l'un des syphons, on chauffe seulement le mercure de la capsule intermédiaire; on remet aussitôt le syphon rempli de mercure, et on établit ainsi un contact entre une grosse masse de mercure chauffé et le mercure froid du syphon, sans que le galvanomètre accuse aucun courant, sauf quelques légers mouvements de l'aiguille très-irréguliers qui proviennent du réchauffement de l'un ou

l'autre des deux fils du galvanomètre, par l'effet du passage qui a toujours plus ou moins lieu du mercure chaud à l'une ou l'autre des deux capsules extrêmes.

Quelques objections contre ce procédé ayant été faites par M. Vorsselmann de Heer et par M. Peltier, M. Matteucci en a employé un autre qui l'a conduit au même résultat. Il consiste à prendre un creuset en terre au fond duquel sont mastiqués deux tubes de verre recourbés; le creuset est séparé en deux compartiments par un diaphragme formé d'une lame de bois qui glisse dans une coulisse, et qui peut par conséquent s'enlever à volonté. On commence par remplir les deux tubes de mercure et on y fait plonger les deux bouts du galvanomètre. On verse ensuite dans l'un des compartiments du mercure refroidi à — 10°, et dans l'autre du mercure à + 180°. Puis on enlève le diaphragme en le faisant glisser dans la coulisse. On produit ainsi un contact immédiat entre le mercure chaud et le mercure froid, exactement comme Nobili et Becquerel opèrent pour montrer la production des courants thermo-électriques avec des fils métalliques; et cependant on n'obtient aucune déviation de l'aiguille, quoique le galvanomètre soit construit de façon à être aussi sensible que possible pour les courants thermo-électriques.

Ce qui fait que plusieurs physiciens ont cru que le mercure pouvait donner des courants thermo-électriques, c'est qu'il est très-difficile d'éviter le contact du mercure chaud avec les fils du galvanomètre. Or, il suffit, comme M. Matteucci l'a démontré, de plonger deux fils métalliques homogènes aussi bien qu'hétérogènes, dans deux masses de mercure qui communiquent entre elles au moyen d'un syphon rempli de mercure, et dont l'une est chaude et l'autre froide, pour obtenir un courant thermo-électrique qui va du métal chaud au froid dans le fil du galvanomètre, chez la plupart des métaux, tels que l'antimoine, le platine, le cuivre, le zinc, le fer, et même avec le charbon : le bismuth seul fait exception. Si les surfaces du métal sont bien polies, on a un courant qui va du bismuth froid au chaud, au lieu d'aller, comme pour les autres, du chaud au froid, quelle que soit la différence de la température

des deux masses de mercure. Le bismuth donne un courant qui va au contraire du métal chaud au froid si, au lieu d'établir le circuit à travers le mercure, on pose le métal chauffé à la lampe à alcool sur le métal resté froid ; l'antimoine et le platine donnent de leur côté, dans ce cas, un courant qui va du froid au chaud, au lieu de cheminer du chaud au froid, comme lorsqu'ils étaient immergés dans le mercure. Le cuivre, le zinc, le fer et le charbon ne changent pas, du moins quand ils n'éprouvent aucune altération par l'action de l'air, car si le cuivre est oxydé, la direction du courant est renversée même quand on établit le circuit à travers le mercure. Le fer, quoique oxydé, ne varie pas dans la direction du courant qu'il produit.

M. Gaugain, dans des expériences récentes, a confirmé en partie, et modifié sur quelques points, les résultats obtenus par M. Matteucci. Il opère tout simplement en mettant en rapport avec un galvanomètre les deux fils soumis à l'expérience ; il réunit leurs extrémités libres en les posant l'une sur l'autre ; puis il chauffe tour à tour chacun des deux fils au moyen d'une lampe à alcool placée près du point de jonction, et il observe le sens de la déviation correspondante à chacune des deux positions de la source de chaleur. Les fils avaient tous dans ses expériences 1 millimètre de diamètre environ, et étaient recuits. Avec des fils de cuivre et de fer, le courant marche du fil froid au fil chaud, si les surfaces de contact sont bien métalliques. Si ces surfaces sont oxydées ou carbonées, le courant marche du fil chaud au fil froid. Avec des fils d'argent et de zinc, les résultats sont inverses.

En opérant sur des circuits formés de deux fils de nature différente, M. Gaugain a trouvé un bien plus grand nombre encore d'irrégularités. Le sens du courant dépend non-seulement du fait que les deux fils aient entre eux un contact métallique, ou qu'ils soient séparés par une couche d'oxyde ou de carbure, mais aussi de la température absolue à laquelle ils sont exposés. Ce courant varie même suivant que, dans le cas du contact métallique, les fils sont fortement pressés l'un contre l'autre, ou ne font que se toucher légèrement ; il est clair que

le changement, lorsqu'il a lieu dans ce dernier cas, tient à ce qu'il se forme par l'effet de la chaleur une légère couche d'oxyde sur la surface de contact de l'un des métaux. Ainsi tous les phénomènes rentrent dans les deux catégories, ou contact métallique immédiat, ou couche soit d'oxyde, soit de carbure, interposée entre les deux métaux. Alors, au lieu d'un seul couple on en a deux formés, le premier de l'un des métaux et de la couche d'oxyde, le second de la même couche d'oxyde et de l'autre métal, et l'effet observé n'est que la différence des effets dus à chaque couple séparément. A l'appui de cette explication, M. Gaugain cite le fait d'une lame mince de platine qui, interposée entre deux fils d'argent, change le sens du courant, lequel marche du froid au chaud au lieu de marcher du chaud au froid, comme cela avait lieu quand les deux fils d'argent étaient en contact immédiat.

Les expériences de M. Gaugain, comme celles de M. Matteucci, nous montrent que les phénomènes thermo-électriques sont moins simples que ne l'avaient cru MM. Becquerel et Nobili. Déjà les recherches de Yelin et de Sturgeon avaient prouvé l'influence considérable qu'exerce sur le résultat la structure moléculaire du corps où se propage la chaleur. Ainsi Sturgeon avait trouvé, en faisant des cadres ou des anneaux de bismuth ou d'antimoine, qu'il y a dans ces cadres des points qui, lorsqu'on les chauffe, produisent des courants et d'autres qui n'en développent point; il avait nommé ceux-ci *points neutres;* ces points ont ceci de caractéristique que, si on chauffe le métal à leur droite, on a un courant d'un sens opposé à celui qu'on obtient quand on chauffe à leur gauche. M. Matteucci s'est assuré que le point neutre se trouve aussi bien pour l'antimoine que pour le bismuth dans la portion de l'un des côtés du cadre qui correspond au point par lequel on a coulé le métal dans le moule qui lui a donné sa forme, ce qui semble indiquer que la tranche correspondante est comme la surface de contact des deux portions du cadre qu'elle sépare. Quant au sens absolu du courant, il va dans le bismuth de la partie froide à la partie chaude à travers la tranche de contact, et il suit une direction inverse dans l'antimoine. Quand on laisse refroidir

lentement dans le moule le cadre de bismuth ou d'antimoine, on obtient des points neutres partout où s'est fait un champignon, c'est-à-dire partout où la matière liquide inférieure a soulevé la croûte. M. Matteucci, qui a fait un grand nombre de recherches sur ce sujet, ajoute la remarque importante que la matière présente dans tous les points neutres une cristallisation différente de celle du reste du métal.

Nous ne nous arrêtons pas aux expériences de M. Vorsselmann de Heer qui, en opérant avec le bismuth et l'antimoine, a vu le courant aller dans le même métal, tantôt du métal chaud au froid, tantôt du froid au chaud, variations qu'il croyait pouvoir attribuer à la différence de température plus ou moins grande entre les deux barreaux mis en contact. Toutes ces irrégularités tiennent à l'état cristallin des substances, ainsi que l'ont démontré successivement M. Svanberg, M. Frantz et M. Matteucci lui-même.

M. Svanberg, à la suite des recherches de M. Faraday sur le pouvoir magnéto-cristallin du bismuth et de l'antimoine, et de l'observation de ce savant sur l'existence dans ces cristaux d'un plan de clivage doué d'un plus grand éclat que les autres, s'est procuré des barres de bismuth et d'antimoine dont les unes avaient leur longueur perpendiculaire à ce plan de clivage comme l'axe magne-cristallique de Faraday [1], tandis que la longueur des autres coïncidait avec l'intersection de ce plan de clivage, doué du plus grand éclat, et d'un autre dont l'éclat ne le cède pas beaucoup à celui du premier. Les premières barres sont plus négatives, et les secondes plus positives dans la série thermo-électrique, que toute autre barre qu'on formerait du même métal. M. Svanberg a fait la remarque importante que, pour l'antimoine aussi bien que pour le bismuth, si les deux barres mises en contact sont celles dont la longueur est perpendiculaire au plan de clivage principal, le courant va du métal chaud au froid, tandis que si ce sont celles dont la longueur est parallèle à l'intersection des deux plans de clivage, le courant va du métal froid au chaud. On n'obtient aucun

[1] Tome I, page 507.

renversement du courant en faisant porter la différence de température entre les deux extrémités mises en contact. Il résulte donc de là que les différences observées quant au sens du courant, et les changements que ce sens éprouve souvent, tiennent dans le bismuth et l'antimoine à leur état cristallin et à la position des plans de clivage de l'échantillon soumis à l'expérience par rapport au point de contact du métal chaud et du métal froid.

M. Frantz a étudié l'influence de la position du plan de clivage principal sur le pouvoir thermo-électrique, d'échantillons cubiques de bismuth et d'antimoine. Ces échantillons, du volume d'un centimètre cube environ, ont été taillés de façou que, dans chacun, la direction du plan principal de clivage, ou fût parallèle à deux des faces, ou formât un angle de 30° avec l'une des faces, et par conséquent de 60° avec l'autre. Par ce moyen, on peut placer deux cubes l'un contre l'autre, de manière que leurs plans de clivage soient parallèles, ou inclinés l'un à l'égard de l'autre, de 30° ou de 60°. Pour opérer, M. Frantz place les cubes entre des lames de verre poli fixées solidement, et il les fait communiquer avec les fils du multiplicateur au moyen de petites colonnes en cuivre en forme de prisme carré. Un cylindre de verre qu'on a chauffé dans un bain de sable est placé exactement sur la ligne de contact des cubes soumis à l'expérience, ce qui permet de chauffer cette ligne d'une température constante et facile à mesurer. Au moyen d'un levier disposé convenablement, qu'on charge de poids plus ou moins considérables, on presse les cubes l'un contre l'autre pour rendre leur contact plus intime; la pression était en général dans les expériences de M. Frantz de 7 ½ kilogrammes.

Les deux cubes placés entre les colonnes de cuivre furent d'abord deux cubes de bismuth; on les disposa de façon que leurs plans de clivage eussent une direction uniforme et verticale, perpendiculaire à la ligne qui joignait les deux colonnes de cuivre entre lesquelles ils étaient placés; en chauffant leur ligne de contact, on ne développe aucun courant, sauf quelques légers courants irréguliers tenant à la non homogénéité

parfaite de la structure intérieure du métal. Si l'on place des cubes taillés de façon que le plan de clivage soit incliné de 30° à l'horizon, on a un courant de 34°,5′ en chauffant leur ligne de contact; si le plan de clivage est incliné de 60°, la déviation n'est plus que de 19°,7′; les déviations sont exactement de même valeur, mais en sens contraire, quand le plan de clivage est abaissé de la même manière vers la seconde colonne de cuivre au lieu de l'être vers la première. Enfin si les cubes sont placés de manière que dans tous les deux le plan principal de clivage forme le même angle avec le plan vertical, il n'y a aucun courant. Il n'y en a point non plus quand les plans principaux de clivage placés dans une direction axiale forment entre eux un angle de 90°; mais on obtient une déviation moyenne de 45° quand les cubes sont placés l'un contre l'autre de façon que le plan principal de clivage de l'un soit dans une position axiale, et celui de l'autre dans une position équatoriale.

Il résulte des expériences de M. Frantz que dans tout morceau de bismuth taillé de la même manière, l'inclinaison du plan de clivage indique la direction du courant positif développé par l'échauffement du métal, et que lorsqu'on chauffe la place de contact de deux morceaux différents dont les plans principaux de clivage sont inclinés l'un à l'égard de l'autre, il se développe un courant qui part toujours de la direction qui est équatoriale pour ce courant, et avec d'autant plus de facilité que l'angle formé par les plans principaux de clivage est plus grand.

L'antimoine, qui possède aussi un plan principal de clivage tout à fait prédominant, présente les mêmes phénomènes que le bismuth. En pressant l'un contre l'autre deux cubes d'antimoine de manière que leurs plans principaux de clivage soient dans la même position, on n'obtient point de courant lorsqu'on chauffe leur surface de contact jusqu'à 100°; mais on détermine une déviation de 12°,4 en disposant les cubes de façon que le plan de clivage de l'un soit dans une position axiale, et celui de l'autre dans une position équatoriale. Le courant marche aussi, dans ce cas, du cube dont le plan de clivage occupe la position équatoriale par rapport à la surface de con-

tact, à celui dont le plan de clivage occupe la position axiale.

Si l'on met successivement en contact, soit avec le cube de bismuth, soit avec celui d'antimoine, des cubes faits de divers autres métaux, on obtient des courants thermo-électriques dont l'intensité présente des différences considérables, suivant que le plan de clivage du bismuth et de l'antimoine est placé axialement ou équatorialement par rapport à la surface de contact qui est toujours la partie chauffée. Le courant est deux fois plus fort avec le bismuth équatorial qu'avec le bismuth axial quand on le combine avec le fer, le plomb, le zinc, l'argentane, le laiton, l'argent, le cuivre et l'étain ; c'est l'inverse quand on substitue l'antimoine au bismuth. La seule exception est celle que présente l'acier ; avec ce métal le courant est plus fort quand le bismuth est axial que lorsqu'il est équatorial ; avec l'antimoine l'acier se conduit comme les autres métaux. Il ne faut pas oublier que le courant va, dans les combinaisons du bismuth avec les autres métaux, du bismuth au métal à travers la surface de contact chauffée, tandis qu'il va du métal à l'antimoine quand on substitue ce dernier au bismuth.

Voici du reste l'ordre dans lequel on peut ranger les cubes métalliques soumis à l'expérience, en les disposant de manière que chacun donne, pour une température de 100°, un courant positif avec le suivant : *bismuth* (plan de clivage équatorial), *argentane*, *laiton*, *étain*, *cuivre*, *argent*, *zinc*, *plomb*, *acier*, *fer*, *antimoine* (plan de clivage équatorial), *antimoine* (plan de clivage axial).

M. Matteucci a dernièrement vérifié les expériences de MM. Svanberg et Frantz d'une manière complète. Il s'est procuré des tiges passablement longues de bismuth, ayant dans toute leur longueur le clivage parallèle ou perpendiculaire à la longueur, en faisant refroidir très-lentement une couche de bismuth pur, haute de 20 à 25 millimètres, dans une large assiette de terre ; il nomme *équatoriales* les premières et *axiales* les secondes, en se fondant sur la position d'équilibre que ces tiges prennent entre les pôles d'un électro-aimant, et qui manifeste très-bien leur structure uniforme. Il a trouvé qu'avec deux tiges axiales le courant thermo-électrique est dirigé de la tige chauffée à l'autre dans la face de contact, et qu'avec les

tiges équatoriales le courant a une direction opposée. En chauffant la ligne de contact d'une tige axiale et d'une tige équatoriale, on a un courant thermo-électrique qui va de la première à la seconde à la face de contact. Pour faciliter les expériences, il faut prendre deux cubes de bismuth cristallisé dont deux faces sont parallèles au plan principal de clivage. Ces deux cubes sont tenus en contact en étant serrés entre deux tiges de cuivre qui marchent horizontalement à vis et communiquent au galvanomètre; il faut avoir soin de maintenir les contacts entre les tiges et les cubes à une température constante, et d'élever la température de la ligne de contact des deux cubes en la touchant avec une tige de verre chauffée. On n'a plus qu'à faire faire à chaque cube des quarts de révolution pour obtenir les résultats décrits.

Il est évident que l'influence des plans de clivage tient dans ces phénomènes, comme dans ceux du diamagnétisme et dans bien d'autres, à ce que les molécules sont plus rapprochées dans la direction de ces plans que dans une direction perpendiculaire; et la preuve, c'est que M. Matteucci a réussi à développer par la compression dans le bismuth des propriétés thermo-électriques semblables à celles que la cristallisation imprime à ce métal. Le même physicien a observé que la compression peut également déterminer dans le bismuth des différences de conductibilité, soit pour l'électricité, soit pour la chaleur, analogues à celles qui résultent de la disposition naturelle des plans de clivage. Ainsi les tiges de bismuth équatoriales conduisent mieux l'électricité et la chaleur que les tiges axiales; de même la conductibilité pour l'électricité et pour la chaleur est plus grande parallèlement à la direction suivant laquelle le bismuth a été comprimé, que perpendiculairement à cette direction.

M. Matteucci, pour démontrer l'influence de la structure moléculaire sur les phénomènes thermo-électriques, s'est assuré, comme il l'avait fait pour le mercure, qu'il n'y a pas de courant thermo-électrique développé dans le contact du bismuth fondu avec une couche de bismuth également fondu, mais plus chauffé que le premier. Cependant, de deux colonnes

de même longueur et de même diamètre, l'une de bismuth fondu et l'autre de bismuth solide, la première conduit mieux l'électricité que la seconde; ce n'est donc pas aux différences de conductibilité électrique qu'est due la production de la thermo-électricité.

Il résulte donc de tous les faits que nous venons d'énumérer, la démonstration de l'influence considérable qu'exerce sur les phénomènes thermo-électriques la constitution moléculaire des corps. Cette influence avait été déjà constatée en 1844 par M. Mousson, dans une série d'expériences par lesquelles il avait démontré qu'il suffit, dans un fil homogène, de la plus légère différence dans l'état d'équilibre moléculaire de ses différentes parties, pour déterminer un courant par l'application de la chaleur à l'un de ses points, tandis que lorsque le fil est dans un état parfait d'homogénéité moléculaire, il ne se développe pas de courant par l'échauffement d'un point unique quelconque, à moins que cet état d'homogénéité ne soit détruit par l'application même de la chaleur, comme cela a lieu avec un fil écroui et non avec un fil déjà recuit. Le courant qui résulte des différences dans l'état moléculaire varie en direction et en intensité avec les différents métaux. Dans le cuivre et le fer, il va des parties qui sont les plus élastiques à celles qui sont les plus ductiles; dans le laiton, c'est le contraire. M. Mousson avait, indépendamment de ces résultats généraux, reconnu que d'autres circonstances, difficiles à déterminer, influent sur le sens et la force du courant.

M. Magnus a repris dernièrement cette même question, et il est parvenu à des résultats qui nous paraissent déterminer d'une manière très-précise la nature des phénomènes thermo-électriques, et leur liaison intime avec les changements moléculaires. Seulement, pour ne pas altérer l'état moléculaire du fil, il ne faut se servir que de la température de 100° pour le chauffer, et avoir soin que les deux portions où il est en communication avec le galvanomètre aient exactement la même température.

Le premier point à établir, c'est de savoir si le développement du courant qui résulte, dans un fil homogène, d'un accroissement de volume provenant d'un nœud, comme M. Becquerel l'a

obtenu le premier, ou d'une augmentation de diamètre dans une portion de la longueur du fil, est dû à la différence de propagation de la chaleur qui a lieu quand on chauffe le fil près du point, soit au point même où son volume change, ou à une altération dans son état moléculaire, produite par le fait qui a opéré ce changement de volume. Plusieurs expériences ont démontré que c'était à cette dernière cause, et non à la première, que la production du courant devait être attribuée; nous citerons la suivante, qui nous paraît la plus directe et la plus démonstrative. Un gros fil de laiton de 1 mètre de longueur et de près de 7 millimètres de diamètre (fig. 276) fut aminci vers son milieu, de manière à ne conserver, sur une longueur de 16 centimètres, qu'un diamètre de 1 millimètre. En chauffant l'un des points

Fig. 276.

où le diamètre variait brusquement, il n'y eut pas de courant; cette expérience importante, variée de plusieurs manières, donna toujours le même résultat négatif. D'un autre côté, si l'on fait déposer par voie voltaïque une couche très-mince de cuivre sur un fil d'argentane, ce fil, chauffé au point où se termine la couche de cuivre, développe un courant assez fort. C'est un effet analogue que produit une couche mince d'oxyde, quand elle recouvre la surface d'un métal. Ce n'est point à une modification dans le pouvoir rayonnant du métal qu'on peut attribuer l'effet de ces couches, car en modifiant ce pouvoir directement par la superposition de couches non conductrices, on n'obtient point le même résultat.

Ainsi, il paraît bien prouvé que, dans un métal homogène, ce n'est pas d'une inégalité des quantités de chaleur propagées dans les deux directions contraires à partir de la partie chauffée, que dépend la production des courants thermo-électriques, puisque la différence des volumes ne suffit pas à elle seule pour engendrer ces courants, mais qu'il faut nécessairement, aussi bien quand les volumes sont différents que lorsqu'ils sont égaux, une différence dans l'état moléculaire. M. Magnus s'est

de plus assuré que l'écrouissement ou le recuit ne modifient pas sensiblement la conductibilité intérieure d'un gros fil de laiton ou d'argentane, et que, par conséquent, on ne peut pas non plus attribuer les courants thermo-électriques qui se développent dans un fil dont une partie est écrouie et l'autre recuite, à une inégalité dans la quantité de chaleur propagée dans l'une de ces parties et dans l'autre.

Maintenant voici les résultats obtenus par M. Magnus sur des fils amenés à 1 millimètre de diamètre et de 2 mètres de longueur, et recuits seulement sur une longueur de 65 centimètres, en portant chacun d'eux à la température de 1000° au point de séparation de la portion recuite et de la portion écrouie. Dans le tableau suivant, la direction du courant est indiquée comme allant d'une partie du fil à l'autre, à travers le point chauffé.

MÉTAL.	DIRECTION du COURANT.	DÉVIATION.
Laiton.	De la partie recuite à la partie écrouie.	55°
Argent [1].	Id.	46
Acier.	Id.	45
Argent à 750 de fin.	Id.	40
Cadmium.	Id.	25
Cuivre.	Id.	18
Or n° 1 [2].	Id.	10
Platine.	Id.	5
Or n° 2 [3].	Id.	2
Argentane.	De la partie écrouie à la partie recuite.	34
Zinc.	Id.	32
Etain.	Id.	30
Fer.	Id.	4
Plomb.	Douteuse.	0

[1] Contenant 0,0087 de cuivre.
[2] Contenant 0,0097 de cuivre, et préparé avec des frédérics d'or prussiens.
[3] Contenant 0,0014 d'argent, et préparé avec des ducats hollandais.

On peut accroître les effets de la manière suivante : on prend un fil écroui et l'on en fait recuire diverses portions égales

entre elles, séparées par des intervalles égaux; on l'enroule sur un châssis dont la circonférence est égale au double de la longueur d'une partie recuite, de telle sorte que les points de séparation des parties recuites et des parties écrouies se trouvent alternativement des deux côtés opposés du châssis. En chauffant tous les points situés d'un même côté, on détermine des courants de même sens, qui s'ajoutent tous entre eux. L'expérience peut être disposée, par exemple, comme dans la figure 277.

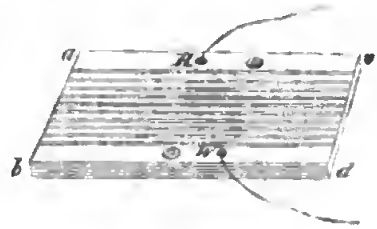


Fig. 277.

Enfin M. Magnus a encore cherché à déterminer le sens et l'intensité du courant produit par le contact de deux fils de même nature, parfaitement homogènes, mais portés à des températures inégales, 8° et 100°, puis 8° et 250°, pour quelques fils seulement. Dans les expériences, les fils étaient ou tous deux écrouis, ou tous deux recuits, ou l'un recuit et l'autre écroui. Avec des fils d'argentane, d'argent fin, de cuivre et d'étain, le courant va du métal froid au métal chaud par la surface de contact, qu'ils soient tous les deux écrouis ou recuits; il va du chaud au froid avec des fils de zinc, de platine, d'or, de cadmium, de laiton et d'argent au titre de 0,750. Quand l'un des fils est écroui et l'autre recuit, le sens du courant est très-variable avec la nature des métaux. Le fer et l'acier ne donnent pas des résultats constants dans ce mode d'expérimentation.

L'appareil au moyen duquel on l'opère est un vase cylindrique en fer-blanc de 10 centimètres de hauteur sur 6 de diamètre (fig. 278). A 2 centimètres et demi au-dessus du fond, se trouvent quatre ouvertures *a*, *b*, *c* et *d*, par où passent quatre tubes horizontaux pénétrant dans l'intérieur jusqu'à un tube vertical *g*. L'un des fils soumis à l'expérience est tendu suivant l'axe des tubes *a* et *b*; dès que ce fil est réchauffé à 100° au moyen d'une lampe qui amène à cette température l'eau dont le vase est rempli, on tend le deuxième fil dans l'axe des tubes *c* et *d*; puis, à l'aide d'un cylindre de bois mobile à frotte-

ment doux dans le tube vertical g, on presse les deux fils contre une pièce de bois f fixée au-dessous de leur point de croisement dans le tube g. Afin que la pression soit la même dans toutes les expériences, on la produit à l'aide d'un poids en plomb p, placé au-dessus du cylindre de bois.

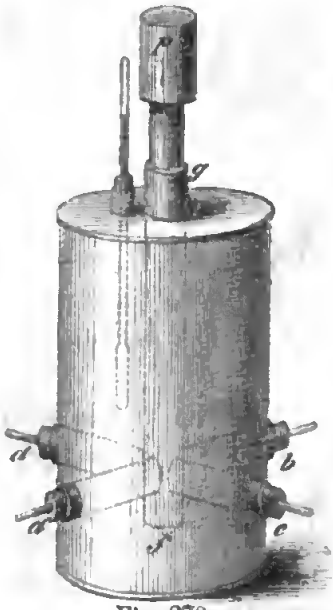


Fig. 278.

Pour opérer à la température de 250° on se servait d'un appareil un peu différent. Ajoutons encore que M. Magnus a confirmé complétement le résultat déjà obtenu par M. Matteucci, savoir qu'il ne se développe pas de courant au contact du mercure chaud et du mercure froid. Voici comme il a opéré : Deux tubes de verre, AC et BD, de la forme représentée figure 279, étaient remplis de mercure; les extrémités A et B des deux masses de mercure étaient mises en communication avec le galvanomètre par des fils de platine qui traversaient des bouchons de liége enfoncés jusqu'à la surface du mercure.

Fig. 279.

Le mercure du renflement C étant chauffé, on y plongea l'extrémité effilée D du tube BD, maintenue à la température ordinaire; dans une autre expérience, on chauffa l'extrémité D, et on la plongea dans la masse C, restée froide; il n'y eut aucune trace de courant. Les colonnes de mercure étaient d'ailleurs restées parfaitement continues, puisqu'elles laissaient

circuler les courants thermo-électriques développés dans d'autres parties du circuit.

En résumé, il nous paraît maintenant bien établi que, dans les phénomènes thermo-électriques, la cause des courants n'existe pas dans le fait même de la propagation de la chaleur, mais dans les effets moléculaires qui accompagnent cette propagation. Aussi, lorsque les deux portions d'un corps sont parfaitement homogènes à gauche et à droite du point chauffé, les effets moléculaires produits par cette chaleur étant identiques, il en résulte deux courants qui, étant appelés à parcourir le même circuit, doivent être égaux en même temps qu'ils sont contraires ; mais la moindre différence dans la nature chimique ou dans la constitution moléculaire de ces deux portions détermine une intensité plus grande dans l'un des courants que dans l'autre, et par conséquent produit un effet qui est accusé par le galvanomètre. Quant au rapport que M. Becquerel croit avoir trouvé entre le pouvoir thermo-électrique des métaux et leur pouvoir rayonnant pour la chaleur, il peut s'appliquer jusqu'à un certain point, en considérant que ces deux pouvoirs sont également liés avec l'état moléculaire des corps, ainsi que nous venons de le prouver pour le premier, et que M. Melloni l'a démontré pour le second.

Nous chercherons plus tard, et quand nous serons plus avancés dans l'étude des sources de l'électricité, à voir comment on peut se rendre compte de la liaison qui existe entre la production de l'électricité et les effets moléculaires qui accompagnent la propagation de la chaleur.

§ 4. Piles thermo-électriques, et application de la thermo-électricité à la mesure des températures.

Peu de temps après la découverte de Seebeck, Fourrier et Oersted eurent l'idée de réunir plusieurs couples thermo-électriques en soudant alternativement ensemble une série de barreaux de bismuth et d'antimoine, et en chauffant les soudures alternatives de manière à en laisser toujours une froide entre

deux chaudes. Une aiguille aimantée, placée simplement sur un des barreaux de ce circuit auquel on avait donné une forme polygonale, éprouvait une déviation prononcée. On obtient le même résultat en maintenant à 0°, au moyen de la glace fondante, les soudures alternatives, celles qui ne sont pas refroidies pouvant être considérées comme chauffées par rapport aux autres. L'effet sur l'aiguille est très-considérable quand on combine le refroidissement et le réchauffement, c'est-à-dire qu'on entoure de glace fondante toute les soudures paires, par exemple, et qu'on réchauffe avec une lampe à alcool toutes les soudures impaires. Les deux savants physiciens augmentèrent le nombre de leurs barreaux alternatifs de bismuth et d'antimoine jusqu'à en mettre 22 de chaque espèce. Ils remarquèrent que l'effet total exercé sur l'aiguille par ce circuit composé est bien inférieur à la somme des effets isolés qu'exerce chacun des circuits simples dont il est formé, mais si, *sans changer la longueur du circuit composé*, on ne met en activité qu'une portion des couples en ne chauffant ou ne refroidissant pas toutes les soudures alternatives, alors on obtient un effet moindre, et on arrive à reconnaître que l'intensité du courant est proportionnelle au nombre des éléments qui sont en activité. D'un autre côté, avec des couples parfaitement semblables placés dans les mêmes conditions de température, et combinés de manière à former des piles de 8, de 16 et de 32 éléments, on obtient des courants de même intensité, quel que soit le nombre des couples de la pile. Un seul couple produit également un courant de même intensité. Il en résulte que dans une pile de 16 couples le courant de chaque couple n'est que la seizième partie de celui que produirait chacun des couples pris séparément, et que si on ne met en activité dans cette pile qu'un seul couple, le courant de la pile n'est que le seizième de celui que développerait ce couple isolé quand il formerait un circuit à lui tout seul.

Ces résultats, déjà signalés par Fourrier et Oersted, ont été confirmés et parfaitement bien expliqués par M. Pouillet à la suite de recherches aussi précises que détaillées. Ils viennent à l'appui des lois que nous avons établies dans le chapitre pre-

mier de la quatrième partie [1] sur l'intensité des courants dans les circuits fermés, et en particulier de cette loi fondamentale que l'*intensité d'un courant est en raison inverse de la longueur du circuit qu'il parcourt.* Et en effet si d'une part, dans une pile thermo-électrique l'intensité du courant est proportionnelle au nombre des couples mis en activité, et que d'autre part cette même intensité soit inverse de la longueur du circuit, et par conséquent de ce même nombre de couples, il doit en résulter que, quel que soit ce nombre, pourvu que les couples soient parfaitement identiques et forment un circuit complétement fermé sans intervention d'aucun autre conducteur, la force du courant sera indépendante du nombre des couples.

C'est essentiellement en faisant usage des courants thermo-électriques que M. Pouillet était arrivé à établir les lois générales qui régissent la propagation des courants électriques dans les bons conducteurs, lois qu'Ohm et Fechner, de leur côté, avaient découvertes en faisant usage des courants voltaïques ordinaires, soit hydro-électriques. Les courants thermo-électriques ont l'avantage, pour ce genre de recherches, d'être plus réguliers et plus constants, et de n'exiger pour leur développement qu'un circuit tout métallique et à l'abri, par conséquent, des perturbations qu'entraîne l'alternative de conducteurs solides et liquides, mais ils présentent l'inconvénient d'avoir une intensité très-limitée.

Pour reconnaître les lois relatives à l'influence qu'exerce

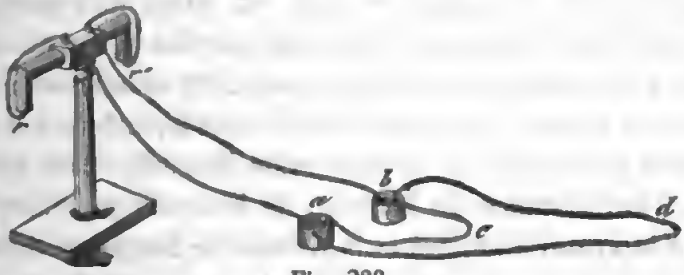


Fig. 280.

sur l'intensité du courant la longueur et la section du circuit, M. Pouillet se servait de deux couples parfaitement

[1] Tome II, page 25.

semblables, formés chacun par un cylindre de bismuth (fig. 280 et 281) aux deux extrémités duquel est soudé un fil de cuivre d'un mètre de longueur; l'une des soudures de chaque couple était maintenue à 0°, et l'autre à 100°, puis leur circuit était fermé par des fils quelconques. On peut s'assurer ainsi, au moyen d'un galvanomètre différentiel dont les deux fils sont traversés en sens contraires par les courants de ces deux couples, que ces courants sont parfaitement égaux. Puis, pour démontrer que leur intensité est en raison inverse de la longueur du circuit, on prend deux fils semblables pour former les circuits des deux couples; mais pour l'un des couples le fil n'a que 8 mètres de longueur, tandis que pour l'autre il en a 98, ce qui fait pour le premier une longueur totale de 10 mètres, et une de 100 mètres pour le second. Avec le circuit de 10 mètres, on fait deux tours sur un cadre de multiplicateur, et 20 avec celui de 100 mètres; alors, en faisant passer les courants en sens inverse, l'aiguille reste immobile. Donc le courant du circuit dix fois plus long est dix fois plus faible, puisqu'il faut qu'il agisse par un nombre de tours dix fois plus grand pour compenser l'effet du courant du circuit dix fois plus court. C'est par un procédé semblable que Pouillet a constaté que l'intensité est proportionnelle à la section, soit en fermant l'un des circuits avec trois ou quatre fils pareils, soit en prenant un fil plus gros dont une portion a été tirée en fil fin afin d'être bien sûr de l'homogénéité du métal, soit en laminant un fil pour montrer que l'étendue de la surface n'a aucune influence pourvu que le volume reste le même. Dans ces expériences, la résistance du barreau de bismuth peut être négligée, vu le grand diamètre et la très-petite longueur de ce barreau, comparés au diamètre et à la longueur du fil de cuivre.

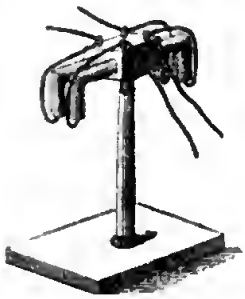


Fig. 281.

Les lois que nous venons de rappeler, jointes aux autres que nous avons établies dans le premier chapitre de la quatrième partie, permettent de déterminer la disposition qu'il convient le mieux de donner au multiplicateur pour qu'il ait la plus

grande sensibilité dans la mesure des courants thermo-électriques. Tout dépend de la longueur, et par conséquent de la résistance que possède le circuit thermo-électrique. Supposons qu'elle soit par exemple égale à celle d'un fil de cuivre de 100 mètres de longueur et de $\frac{1}{10}$ de millimètre de diamètre ; si l'on met dans le circuit un multiplicateur dont le fil ait cette longueur et ce diamètre, on réduit de moitié l'intensité du courant, mais on a autour du cadre du multiplicateur un très-grand nombre de tours qui seront très-rapprochés et agiront fortement sur les aiguilles. Si on ne donne que 10 mètres de longueur au fil, l'intensité du courant ne sera réduite qu'au $\frac{10}{11}$ de son intensité primitive, au lieu de l'être à la moitié, mais aussi on fera avec les 10 mètres dix fois moins de tours qu'avec 10 ; et il est évident que cent tours, dont chacun agit avec une intensité $\frac{1}{2}$, produisent sur les aiguilles beaucoup plus d'effet que dix, dont chacun agit avec une intensité $\frac{10}{11}$; dans le premier cas, l'intensité est 50, dans le second $\frac{100}{11}$, soit à peu près 9. Si le fil du galvanomètre multiplicateur était plus gros, tout en restant de la même longueur, si par exemple il avait un millimètre de diamètre, son interposition dans le circuit ne changerait presque rien à l'intensité du courant, ainsi qu'il est facile de le voir ; aussi en résulterait-il un effet bien plus considérable sur les aiguilles ; mais cependant il faut observer que, quoique le nombre des tours reste le même, la plus grande épaisseur du fil fait qu'ils sont plus distants des aiguilles et agissent par conséquent moins fortement sur elles. Il importe donc dans la construction du galvanomètre multiplicateur destiné à la mesure des courants thermo-électriques, d'apprécier avec soin ces divers éléments et de savoir en tenir compte. En général, les fils de ces galvanomètres doivent être gros et courts, surtout quand le circuit n'a lui-même que très-peu de longueur, et offre par conséquent très-peu de résistance au courant. Ajoutons que si l'on est maître de réduire la longueur du circuit comme l'on veut, le multiplicateur ne multiplie plus, car en supposant que la résistance d'un couple thermo-électrique puisse être négligée, il est évident qu'avec un fil d'une nature et d'un diamètre déterminés pour avoir

dix tours au multiplicateur, il faut donner au fil une longueur décuple qui réduit l'intensité à sa dixième partie, de sorte qu'on perd autant qu'on gagne, puisqu'un seul tour aurait dix fois plus de puissance que chacun des dix. Aussi obtient-on plus d'effet avec le couple antimoine et bismuth de la fig. 268, en le faisant agir directement sur une aiguille aimantée qu'en interposant dans son circuit un galvanomètre multiplicateur.

On conçoit facilement, d'après ce qui précède, que l'interposition dans le circuit thermo-électrique de conducteurs qui présentent une assez grande résistance au courant, tels que des fils très-fins de métal, des liquides ou le corps humain, doivent singulièrement affaiblir ce courant. Aussi pour produire avec une pile quelques-uns des effets qui exigent une assez grande tension électrique, tels que les effets chimiques par exemple, on est obligé d'augmenter la résistance de la pile elle-même en la composant d'un très-grand nombre de couples, et en employant pour former ces couples des métaux aussi peu conducteurs que possible. En augmentant le nombre des couples, on n'augmente pas la force du courant, ainsi que nous l'avons vu, mais on diminue beaucoup l'affaiblissement que ce courant éprouvera par l'interposition dans le circuit d'un conducteur imparfait. C'est ainsi que Botto a réussi à décomposer l'eau légèrement acidulée par le courant d'une pile thermo-électrique formée de cent vingt bouts de fil de platine, chacun de 2 centimètres et demi de longueur et de $\frac{1}{4}$ de millimètre de diamètre, alternant avec autant de bouts de fils de fer doux de même dimension. La chaîne formée par cette succession de ces deux cent quarante bouts de fils était enroulée autour d'une règle de bois de 50 centimètres de longueur, de manière que les points de contact impairs fussent d'un côté de la règle, et les pairs de l'autre côté à 1 centimètre environ de distance des premiers qu'on chauffait avec une lampe à alcool aussi longue que la règle.

M. Poggendorff a aussi imaginé une combinaison thermo-électrique qui ne peut pas, il est vrai, être soumise à une température aussi élevée que celle du fer et du platine, mais qui est néanmoins presque aussi efficace, tout en étant bien plus

économique; il l'obtient en remplaçant le platine par l'argentane, qui est un métal éminemment positif dans la série thermo-électrique, car il suit immédiatement le bismuth et précède le platine. A température égale, et pour un même nombre de couples, la pile argentane et fer a une force électro-motrice plus grande que la pile platine et fer, ainsi que Poggendorff l'a constaté par une comparaison directe faite au moyen d'un galvanomètre différentiel. Dans cette pile, les fils peuvent être

Fig. 282.

arrangés à la suite les uns des autres le long d'une ligne droite (fig. 282), ou disposés en zigzag (fig. 283), ou même en faisceau (284), afin qu'il soit plus facile d'opérer un changement de température entre les points de contact pairs et les impairs.

Fig. 283.

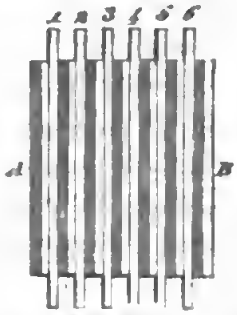


Fig. 284.

Dans toutes ces figures, les traits foncés indiquent les fils d'argentane et les clairs les fils de fer. La tension de l'électricité, aux deux extrémités de cette pile, augmente avec le nombre des couples et avec la différence de température qu'on établit entre les soudures paires et impaires. Kohlrausch en a construit une formée de 769 couples, et présentant par conséquent 769 points de contact impairs et autant de pairs. Chaque couple était formé d'un fil de fer long de 6 centimètres et de $\frac{1}{4}$ millimètre de diamètre, et d'une bande étroite d'argentane; les soudures étaient faites à l'étain; les couples étaient fixés dans de la cire, et des petites bandes de bois servaient à les maintenir dans une position convenable. La pile se terminait à ses deux extrémités par les fils de fer situés dans la partie

supérieure du faisceau sur laquelle pouvait s'ajuster un plateau rempli de neige ou de glace fondante, tandis que la partie inférieure était étroitement enfermée dans une boîte de tôle qu'on plongeait dans de l'eau. Mise en communication avec le condensateur par l'une ou l'autre de ses extrémités, la pile ne parvint à le charger que lorsque l'eau eut été réchauffée par une lampe à alcool ; alors on obtint de l'électricité positive à l'extrémité B, les points de soudure impairs étant ceux qu'on réchauffait, et de la négative à l'extrémité A. Des mesures précises prises au moyen de la balance électrique montrèrent que la tension électrique de chacun des pôles augmentant avec le nombre des couples, était de 0,79 avec 349, de 1,18 avec 420, et de 1,97 avec 769.

Avec une pile thermo-électrique de barreaux de bismuth et d'antimoine construite de la même manière, mais dans laquelle il n'y a que 20 couples, et dont les barreaux ont 10 à 12 centimètres de longueur sur 4 à 5 millimètres de diamètre, on obtient des courants qui sont très-propres à produire des effets d'induction, et peuvent donner de fortes étincelles quand on les fait passer à travers un gros fil ou un ruban métallique roulé en spirale. Il faut seulement, pour avoir plus d'effet, remplacer l'eau chaude par une lame de tôle qu'on chauffe à la lampe.

La pile thermo-électrique, comme on peut le comprendre d'après la description que nous en avons donnée, n'est pas un instrument de nature à être très-utile pour la production des courants électriques, sauf dans quelques cas particuliers où il s'agit moins d'étudier les effets de l'électricité dynamique que de déterminer les lois de sa propagation. Mais elle peut rendre à la science des services d'un autre genre, en lui fournissant un moyen plus sensible qu'aucun autre connu d'apprécier les différences de température. C'est à M. Nobili qu'on doit cette application importante de la thermo-électricité. Il construisit d'abord une pile thermo-électrique formée de six couples bismuth et antimoine disposés en couronnes, et placés dans l'intérieur d'une boîte cylindrique de façon que les points de contact impairs fussent dans la partie supérieure, et que les

pairs placés inférieurement, fussent cachés au fond de la boîte et entourés d'une couche de mastic s'élevant jusqu'à 6 ou 7 millimètres seulement au-dessus des points de contact impairs. Les extrémités de la pile étaient soudées à deux appendices en cuivre qui, sortant de la boîte, servaient à mettre la pile en communication avec les extrémités d'un galvanomètre multiplicateur à deux aiguilles. M. Nobili ayant placé la boîte thermo-électrique sous un récipient de la pompe pneumatique, obtint en raréfiant l'air un refroidissement qui se faisant sentir immédiatement aux points de contact supérieurs non entourés de mastic, produisit un courant très-prononcé; il put s'assurer ainsi que la sensibilité de son thermo-multiplicateur était 15 à 20 fois plus grande que celle du thermomètre métallique de Breguet. Divers perfectionnements furent apportés par MM. Nobili et Melloni à l'appareil primitif du premier, et ces deux physiciens parvinrent au moyen de leur thermo-multiplicateur à découvrir la présence de la chaleur dans les insectes, dans les corps phosphorescents, en un mot dans un grand nombre de cas où l'on n'avait pas encore pu la soupçonner. Mais c'est essentiellement à Melloni qu'on doit, par les soins qu'il a apportés à la construction de la pile thermo-électrique, d'en avoir fait l'un des instruments les plus précieux de la physique expérimentale.

La pile de M. Melloni se compose de cinquante petits barreaux de bismuth et d'antimoine très-déliés, ayant environ 4 à 5 centimètres de longueur, soudés les uns aux autres de manière que les barreaux de bismuth alternent avec ceux d'antimoine comme le représente la figure 285, et disposés de façon

Fig. 285.

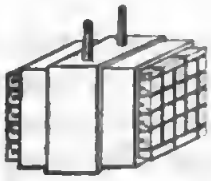


Fig. 286.

à former un petit faisceau solide et compact (fig. 286), au moyen d'un mastic isolant qui remplit les vides que laissent

entre eux les barreaux qui ne doivent se toucher qu'aux soudures. Les deux barreaux extrêmes de la chaîne, l'un de bismuth, l'autre d'antimoine, viennent communiquer au moyen de deux fils de cuivre assez gros mais très-courts, l'un à la cheville x et l'autre à la cheville y, qui forment ainsi les deux pôles de la pile qu'on met en communication avec les deux extrémités du fil d'un multiplicateur. Les deux chevilles passent à travers un morceau d'ivoire fixé sur un anneau métallique qui embrasse la pile thermo-électrique et peut, au moyen d'un appendice muni d'une charnière, permettre de déplacer l'axe de la pile dans toutes les directions voulues. Il faut avoir soin de noircir les faces terminales de la pile, et on recouvre d'un étui métallique bien poli qui l'enveloppe sans la toucher, celle de ces faces qu'on veut maintenir à une température ambiante pendant que l'autre, laissée à découvert, est exposée aux sources de chaleur et de froid. La sensibilité de cet appareil est telle que si l'on tourne la face découverte de la pile vers une personne placée même à 25 pieds de distance, la déviation de l'aiguille aimantée accuse l'émanation du calorique rayonnant.

Pour que le galvanomètre multiplicateur adapté à la pile fût le plus sensible possible, il faudrait connaître la longueur du fil de ce galvanomètre équivalente en conductibilité au circuit même de la pile, et conclure de là le nombre de tours nécessaires à donner à l'instrument; mais par de simples tâtonnements, Melloni est parvenu à trouver le galvanomètre multiplicateur qui remplit le mieux le but. Le fil d'un cuivre aussi pur que possible est d'un diamètre de $\frac{8}{5}$ de millimètre, de 7 à 8 mètres de longueur; il fait 40 circonvolutions autour du cadre; ces tours sont symétriquement disposés de part et d'autre de la ligne moyenne sur une largeur de 4 centimètres; les aiguilles bien choisies, aimantées et compensées avec soin sont liées entre elles au moyen de deux fils fins de cuivre tordus ensemble, et délicatement suspendus à un fil de cocon. Ainsi construit, le thermo-multiplicateur est d'une sensibilité extrême, quoiqu'il semble au premier coup d'œil que l'intervention du fil du galvanomètre doive diminuer l'intensité du

courant; mais cette diminution très-légère, vu le peu de longueur et la grandeur du diamètre du fil d'une part, et le nombre considérable ainsi que la petite dimension des barreaux de bismuth et d'antimoine d'autre part, est plus que compensée, ainsi que nous l'avons déjà vu, par l'augmentation d'effet qui résulte du nombre de tours qui agissent sur les aiguilles aimantées. Il est à remarquer également que le nombre assez considérable de couples thermo-électriques dont se compose la pile a le double avantage de permettre de présenter une plus grande surface à l'action de la chaleur, et de rendre efficace l'intervention du multiplicateur dont l'interposition, s'il n'y avait qu'un seul couple, affaiblirait trop le courant.

Pour se servir de l'instrument dans la mesure des températures, M. Melloni a d'abord constaté par une comparaison avec des thermomètres ordinaires, qu'avec les piles de bismuth et d'antimoine l'intensité du courant est proportionnelle à la différence de température des soudures; puis il a réussi, en faisant varier d'une quantité connue la quantité de chaleur, à établir le rapport qui lie les intensités du courant, aux déviations de l'aiguille, mesurées au moyen d'une division circulaire faite avec beaucoup de soin [1]. Dans les appareils de M. Melloni l'intensité est exactement proportionnelle à la déviation jusqu'à 20°; pour des déviations plus considérables, une table à dix colonnes dressée empiriquement donne les intensités correspondantes aux déviations observées; mais il faut tâcher, pour obtenir plus d'exactitude, comme M. Melloni a réussi à le faire, à ne pas avoir de déviations qui dépassent sensiblement 30°.

M. Pouillet a également appliqué la thermo-électricité à la mesure des températures, en construisant un instrument qui,

[1] M. Melloni distingue la *déviation impulsive* et la *déviation définitive*, c'est-à-dire le maximum d'écart que l'aiguille atteint par son premier mouvement d'impulsion, et l'écart où elle s'arrête après une série d'oscillations; il a saisi les rapports constants qui existent entre elles, et qui permettent de déduire l'une de l'autre, quand on a dressé préalablement une table de ces rapports pour chaque appareil.

Fig. 287.

sous le nom de pyromètre magnétique, pût mesurer toutes les températures, depuis les plus grands degrés de froid jusqu'aux plus hauts degrés de chaleur. L'instrument comprend deux pièces distinctes, savoir un galvanomètre ou boussole à sinus formé avec un ruban de cuivre de 15 à 20 millimètres de longueur [1], et l'appareil thermo-électrique même. Ce dernier (fig. 287) se compose d'un tube de fer ou plutôt d'un canon de fusil *a b*, et d'un fil de platine qui part du milieu *c* de la culasse du fond, en étant incorporé à la masse du fer; il traverse l'axe du tube pour venir se rendre à la pièce de cuivre rouge *x*; de la culasse annulaire *d* part un second fil de platine qui vient se souder à la pièce de cuivre; le second fil est maintenu par un corps mauvais conducteur au milieu de l'ouverture de la culasse annulaire *d* pour qu'il ne puisse pas la toucher; *f* est une pièce de bois fixée sur le bout du tube, et destinée à porter les deux pièces de cuivre *x* et *y*. La communication entre le multiplicateur et le pyromètre proprement dit s'établit au moyen de deux fils de cuivre de 1 millimètre de diamètre environ qui viennent aboutir d'une part aux pièces *x* et *y* du pyromètre, et d'autre part aux extrémités du ruban dont se compose le multiplicateur.

M. Pouillet a gradué son instrument par la comparaison avec un pyromètre à air, mais l'intensité du courant est loin d'être proportionnelle à la température, du moins avec le couple de platine et fer. Il n'en est pas de même avec un couple bismuth et cuivre; des expériences faites comparativement avec un pyromètre à air et un thermomètre à alcool, ont montré que l'in-

[1] Tome I, page 336.

tensité du courant de ce couple, mesurée par le galvanomètre à sinus, est bien proportionnelle à la température à partir de 100° au-dessus de 0° jusqu'à 78° au-dessous. Les basses températures ont été obtenues au moyen de la pâte d'éther et d'acide carbonique, dans laquelle on plongeait l'une des soudures du couple, pendant que l'autre était dans la glace fondante. Le pyromètre thermo-électrique donne — 40°,5 pour la température de congélation du mercure, ce qui est d'accord avec les indications du thermomètre à air.

La question des rapports qui existent entre les intensités des courants thermo-électriques et les températures correspondantes avait déjà été traitée par M. Becquerel, comme nous l'avons vu dans le § 2; néanmoins, malgré ces recherches et celles de M. Pouillet, elle laissait encore à désirer au point de vue de la confiance qu'on pouvait attacher pour la mesure précise des températures à l'emploi des propriétés thermo-électriques des métaux. C'est ce qui engagea M. Regnault à étudier avec soin, dans ses recherches sur la chaleur, ce procédé thermo-électrique d'après une méthode assez différente de celles dont on avait fait usage jusqu'alors, et qui le conduisit à des résultats importants.

Il construisit d'abord un couple bismuth et antimoine formé de deux barreaux A B C D (fig. 288), obtenus par moulage,

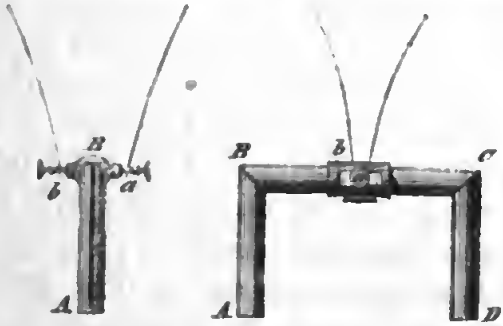


Fig. 288.

et qui parfaitement semblables sont juxtaposés dans toute leur étendue, étant séparés par une lame mince d'ivoire qui ne leur permet de se toucher qu'aux extrémités A et D où se trouvent les deux soudures; l'appareil est divisé de façon qu'on

puisse introduire dans le circuit le fil d'un galvanomètre. Ce couple, dont les branches verticales ont 12 centimètres de longueur tandis que la branche horizontale en a 20, est le couple *normal* auquel tous les autres couples thermo-électriques doivent être rapportés; mais il ne doit servir que pour les températures peu élevées qui ne dépassent pas 30°.

Le couple destiné aux hautes températures est formé par un fil de fer et par un fil de platine de 1 millimètre de diamètre, dont les extrémités sont soudées à l'argent; le fil de fer E et F (fig. 289) a 80 centimètres environ de longueur, et les deux fils de platine E *c* et F *d* sont attachés auprès du fil de fer dont ils sont séparés par une enveloppe isolante; dans la partie inférieure les fils sont séparés par une lame de verre mince; ils sont terminés par deux appendices en laiton qui permettent d'introduire dans le circuit un fil galvanométrique.

Fig. 289.

Le galvanomètre dont on fait usage est un galvanomètre différentiel très-sensible dont l'un des fils est introduit dans le circuit bismuth et antimoine, et l'autre dans le circuit fer et platine. Le couple normal bismuth et antimoine est disposé de manière que les deux soudures plongent dans deux vases remplis d'eau à différentes températures, et séparés l'un de l'autre par un écran; deux thermomètres très-exacts et rigoureusement comparés donnent la température dans laquelle chacune des soudures est placée. Les soudures E et F des couples fer et platine sont maintenues dans des tubes de verre remplis d'une huile fine qui ne renferme pas d'oxygène; l'un des tubes est placé dans une chaudière pleine d'huile avec un thermomètre à mercure marchant de 0° à 350°; l'autre qui renferme la seconde soudure est maintenu à une température constante au moyen de glace fondante ou dans un grand bain d'eau à côté du thermomètre à mercure.

Les appareils étant ainsi disposés, si l'on porte la soudure F du couple fer et platine à une température mesurée par le thermomètre du bain d'huile, il en résulte un courant qui

dévie l'aiguille du galvanomètre; mais en élevant de la quantité nécessaire la température de l'une des soudures du couple bismuth et antimoine, on obtient un second courant qui, dirigé en sens contraire du premier, neutralise son effet et ramène l'aiguille au 0°. On note les températures que marquent les deux thermomètres au moment de la neutralisation. La différence de température qui produit sur le couple bismuth et antimoine un courant capable de neutraliser celui que produit une certaine différence de température sur le couple fer et platine, est beaucoup moindre que cette dernière, car celle-ci étant de 100°, la première n'est que de 6°,5.

En portant le bain d'huile à différentes températures, on obtient des courants dans le couple fer et platine, qui font équilibre sur le galvanomètre à des courants produits dans le couple bismuth et antimoine par des différences de température correspondantes. On peut donc dresser une table dans laquelle sont inscrites d'un côté les différences de température $T' - T$, $T'' - T$, $T''' - T$, du couple fer et platine mesurées par le thermomètre à air, et de l'autre les différences de température $t' - t$, $t'' - t$, $t''' - t$, du couple bismuth et antimoine. Si l'on veut mesurer une température élevée avec le couple fer et platine, il suffit de chercher la température $t'' - t$, qui lui fait équilibre, avec le couple bismuth et antimoine, et on trouve dans la table la température $T' - T$ correspondante sur le couple fer et platine. Il faut, pour que les résultats soient exacts, que les deux couples restent constamment parfaitement comparables. Or un très-grand nombre d'expériences ont montré à M. Regnault qu'il n'en est pas toujours ainsi, et que les variations tiennent probablement à des changements qui s'opèrent dans l'état moléculaire des métaux à l'endroit des soudures. C'est surtout dans le couple fer et platine qu'elles se font sentir; car le couple bismuth et antimoine donne des résultats assez constants quand on fait varier la température des soudures entre des limites qui n'étaient pas dépassées dans les expériences comparatives, c'est-à-dire de 15° à 30°. Entre ces limites, une différence de température de 1° produit sensiblement au galvanomètre la même déviation de 17°, quelle que soit

leur température absolue; mais ce qui est assez curieux, et assez contraire à l'opinion généralement reçue, c'est qu'une augmentation de 1° dans la différence de température des deux soudures du couple bismuth et antimoine produit un accroissement dans le courant d'autant plus faible que la différence de température est plus grande, même entre les limites de 15° à 35°. Ce résultat est facile à vérifier en opposant au courant thermo-électrique dans le galvanomètre différentiel, de manière à lui faire équilibre, un courant hydro-électrique très-constant et très-faible, dont on augmente la force graduellement à mesure qu'on élève la température de l'une des soudures du couple bismuth et antimoine. L'équilibre établi, on accroît de 1° la différence de température entre les deux soudures, et on obtient pour cet accroissement une déviation d'autant moindre que cette différence était déjà plus grande.

M. Regnault avait fait quelques essais avec des couples formés de fils métalliques autres que ceux de fer et de platine, mais le couple fer et platine est encore le plus régulier, et celui dont l'intensité thermo-électrique diminue le moins avec l'élévation de la température; il n'en est pas de même pour un couple fer et cuivre; ainsi la sensibilité de ce couple devient complétement nulle à 240°; puis si on élève la température plus haut, l'aiguille, qui était restée stationnaire de 230° à 260°, rétrograde, et l'intensité du courant, loin d'augmenter avec la température, diminue. Ce changement de direction dans le sens du courant du couple fer et cuivre, à une certaine température, avait été déjà observé, comme nous l'avons remarqué, par M. Becquerel.

Les recherches de M. Regnault nous montrent la difficulté qu'il y a d'employer les courants thermo-électriques à la mesure exacte des températures, et il n'y a rien là d'étonnant une fois qu'il est bien établi, ainsi que nous l'avons vu, que ces courants ne sont pas dus à une simple différence dans la facilité de la chaleur à se propager, mais bien aux changements moléculaires toujours plus ou moins irréguliers qui accompagnent cette propagation.

Toutefois, si le thermo-multiplicateur ne peut pas remplacer

le thermomètre pour l'exactitude dans la mesure des températures, il peut être employé avec avantage dans bien des cas où les thermomètres, même les plus sensibles, ne sont ni assez prompts ni assez délicats pour accuser les changements brusques et peu considérables de température, comme dans les expériences de Melloni sur la chaleur rayonnante. MM. Becquerel et Breschet ont aussi fait une application heureuse de la thermo-électricité pour la mesure de la température des tissus organiques du corps de l'homme et des animaux, en construisant des aiguilles métalliques mixtes d'un diamètre de moins d'un millimètre, qu'ils introduisent par le procédé de l'acupuncture dans un tissu organique. Il faut avoir deux aiguilles composées chacune de deux fils très-fins, l'un de cuivre, l'autre d'acier, soudés ensemble par un de leurs bouts. La soudure de l'une des aiguilles mixtes est placée dans un milieu dont la température demeure constante pendant la durée de l'expérience, la soudure de l'autre aiguille mixte est introduite dans le tissu dont on veut mesurer la température. Les bouts libres d'acier des deux aiguilles sont mis en communication par un fil d'acier, tandis que les bouts libres de cuivre sont réunis par le fil d'un galvanomètre. Lorsque les deux soudures ont la même température, l'aiguille du galvanomètre n'est pas déviée, mais la moindre différence de température, ne fût-elle que de $\frac{1}{10}$ de degré, suffit pour produire une déviation dont le sens et l'étendue servent à évaluer exactement cette différence, et par conséquent la température de l'un des milieux quand celle de l'autre, qui est constante, est connue. Différentes observations faites en mettant la soudure de l'une des aiguilles thermo-électriques dans la bouche, et l'autre par exemple dans le muscle biceps d'un jeune homme, ont donné une déviation de 4° en faveur de la bouche, ce qui correspondait, d'après des expériences préalables faites sur la température de la bouche, à 36°,60 pour cette dernière, et seulement à 36°,20 pour celle du muscle biceps.

La pince thermo-électrique de M. Peltier est construite aussi sur le même principe. Elle consiste en deux couples très-déliés bismuth et antimoine A et B (fig. 290) ; ces deux couples sont

liés entre eux par un fil de cuivre qui unit l'antimoine a' du couple supérieur au bismuth b' du couple inférieur ; et par des

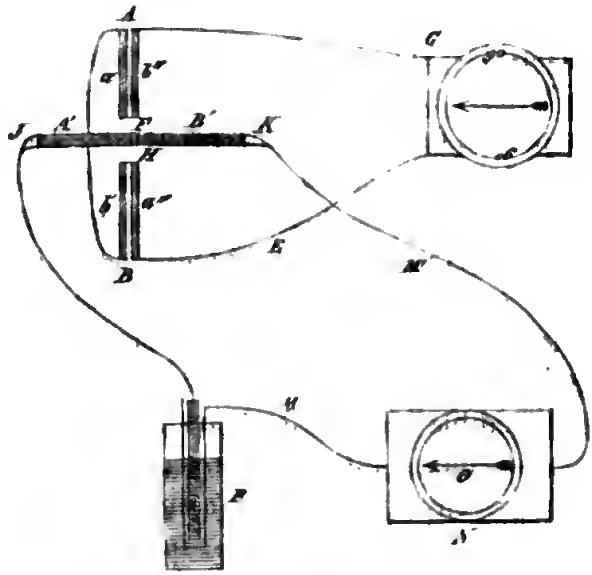


Fig. 290.

fils de cuivre D et E qui, communiquant avec le fil du galvanomètre, complètent le circuit entre le bismuth supérieur b'' et l'antimoine inférieur a''. F et H sont les extrémités libres et soudées de chacun des couples qui forment les mâchoires de la pince, qu'un ressort peut appliquer l'une contre l'autre ou contre une petite portion d'un fil ou d'un barreau métallique dont on veut pouvoir connaître la température dans un moment donné. Dans la figure 290, les deux mâchoires peuvent s'appliquer contre le point de contact F d'un barreau d'antimoine A et d'un barreau de bismuth B, qui sont traversés par le courant d'un couple P dont les conducteurs aboutissent en J et en K. C'est par ce moyen que M. Peltier a constaté que, suivant le sens du courant qui passe de l'antimoine au bismuth, il y a production de chaleur ou production de froid [1]. Ainsi il a obtenu au galvanomètre G de la pince thermo-électrique — 37° quand le courant marchait du bismuth à l'antimoine,

[1] Tome II, p. 244.

et + 45°, c'est-à-dire une déviation de 45° dans l'autre sens qui indiquait un réchauffement au lieu d'un refroidissement, quand le courant marchait de l'antimoine au bismuth. Pour mettre ce résultat à l'abri de toute objection, M. Peltier l'a confirmé, comme nous l'avons dit, en faisant traverser la boule d'un thermomètre à air (fig. 291) par un barreau d'antimoine et de bismuth dont la soudure S était au milieu de la boule. Le courant d'un couple hydro-électrique arrivant à l'assemblage des deux barreaux par les conducteurs *f* et *g* faisait baisser ou monter, suivant le sens dans lequel il cheminait, la colonne d'alcool coloré qui, maintenue dans le tube capillaire, servait d'index.

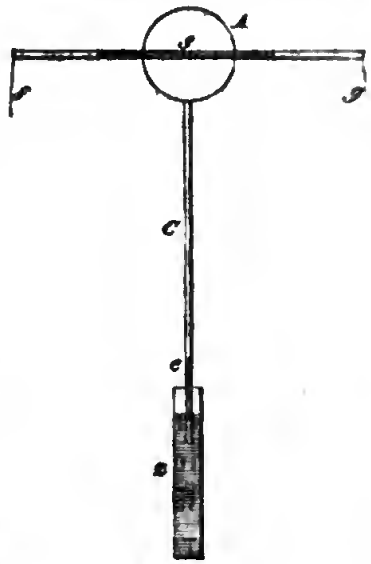


Fig. 291.

§ 5. Rapprochement entre les effets calorifiques du courant et les phénomènes thermo-électriques. — Essai de théorie.

Nous avons déjà fait remarquer, dans le § 8 du chapitre II de ce volume[1], le rapport remarquable qui existe entre les changements de température que produit un courant en passant d'un métal dans un autre, et les effets électriques que détermine un changement de température au point de contact de ces deux mêmes métaux. Peltier, qui le premier a attiré l'attention sur ce sujet, avait cru pouvoir établir comme règle à peu près générale, que la plus grande élévation de température avait lieu quand le courant passe du moins bon conducteur dans le meilleur, et que c'est l'inverse quand le courant change de sens. Ainsi, quand le courant passe d'un fil de fer à un fil de zinc, la température s'élève de 30°, et quand

[1] Tome II, p. 216.

il passe du zinc au fer seulement de 13°; quand il passe du zinc au cuivre, l'élévation de température est de 20°; elle n'est plus que de 14° quand il passe du cuivre au zinc. Avec d'autres métaux, comme nous l'avons vu, ce n'est pas seulement une moindre élévation de température, mais un abaissement notable qu'on obtient en changeant le sens du courant; c'est ce qui a lieu avec le bismuth et l'antimoine en particulier, soit lorsqu'ils sont combinés ensemble, soit lorsque chacun d'eux est combiné séparément avec un autre métal. Ainsi une lame de bismuth soudée entre deux lames de cuivre donne, avec un courant allant du cuivre au bismuth, + 20°[1], et avec un courant allant du bismuth au cuivre, — 10°; une lame d'antimoine dans les mêmes circonstances donne — 5° avec un courant qui va du cuivre à l'antimoine, et + 10° avec un courant qui va de l'antimoine au cuivre; c'est ce qui fait que le maximum d'effet a lieu quand on soude la lame de bismuth et celle d'antimoine, car dans ce cas on a en effet — 37° quand le courant va du bismuth à l'antimoine, et + 45° quand il va de l'antimoine au bismuth.

Ces résultats ne peuvent être obtenus qu'autant que le courant n'est pas trop fort; si on augmente graduellement son intensité, on arrive d'abord à ne plus avoir ni élévation ni abaissement de température à la soudure qui se refroidissait, puis vient une élévation de température toujours moindre que celle qui se manifeste quand le courant change de direction.

L'effet remarquable qui a lieu avec le bismuth montre que la loi de Peltier est loin d'être générale, car il faudrait admettre, pour l'y faire rentrer, que le bismuth est de beaucoup le plus conducteur de tous les métaux, ce qui est loin d'être le cas; de plus l'antimoine et le bismuth qui, par leur combinaison, donnent le maximum d'effet, sont très-rapprochés l'un de l'autre dans l'ordre de leur conductibilité électrique. Ces phénomènes tiennent donc probablement à l'état cristallin de ces métaux,

[1] Ces degrés sont ceux du galvanomètre multiplicateur lié avec la pince thermo-électrique décrite plus haut, qui serre entre ses deux mâchoires le point de contact des deux métaux soudés ensemble.

et il est bien probable que c'est aussi aux différences dans leur structure moléculaire que les autres métaux doivent les différences de température que détermine le courant à leur point de jonction, suivant qu'il est dirigé dans un sens ou dans un autre. C'est seulement sur la chaleur qui est développée dans toute la longueur d'un fil homogène, que la résistance du métal à la transmission de l'électricité exerce une influence que nous avons appréciée et même déterminée. Mais il faut avoir soin de distinguer, comme nous avons déjà dit que Frankenheim l'avait fait[1], cet effet calorifique des variations de température qui ont lieu aux points de contact de deux métaux hétérogènes que traverse un courant. Ce sont deux phénomènes d'un ordre tout différent, et nullement soumis aux mêmes lois; il est quelquefois difficile de démêler la part de chacun d'eux dans le résultat observé, mais ils n'en sont pas moins distincts.

Une autre preuve que le second phénomène est essentiellement lié avec l'état moléculaire des corps, c'est le rapport intime qu'il présente avec la production des courants thermo-électriques, que nous avons vu être un effet des modifications moléculaires que la propagation de la chaleur apporte dans les corps où elle a lieu. En effet, l'élévation de température qui se développe au point de contact d'un barreau de bismuth et de cuivre, quand le courant passe du cuivre au bismuth, produit elle-même un contre-courant qui va directement du bismuth au cuivre. De même l'abaissement de température qui a lieu quand le courant passe du bismuth au cuivre produit un contre-courant qui va du cuivre au bismuth. Remarquons même que ces contre-courants doivent diminuer, légèrement il est vrai, le courant initial qui produit l'élévation ou l'abaissement de température. Ainsi donc il y a une liaison intime entre la cause qui produit le courant thermo-électrique par une élévation ou un abaissement de température au point de contact de deux métaux, et la cause qui détermine par le passage d'un courant extérieur, un abaissement ou une élévation de

[1] Tome II, page 246.

température au point de contact de ces deux mêmes métaux.

M. Frankenheim, guidé par ce genre de considérations, a fait une série nombreuse d'expériences en se servant de l'appareil en croix de Peltier, qui consiste en deux barreaux de bismuth et d'antimoine croisés l'un sur l'autre et soudés à leur milieu. Deux des extrémités de cette croix sont mises en communication avec les pôles d'une pile, et les deux autres avec les bouts du fil d'un galvanomètre. Il résulte de cette combinaison que la chaleur ou le froid développés par l'électricité au point de soudure, produit un courant thermo-électrique qui fait dévier l'aiguille du galvanomètre. En se servant d'un galvanomètre à tangente et d'un rhéostat pour mesurer et régler l'intensité du courant voltaïque, Frankenheim a reconnu que l'élévation de température produite au point de contact qu'il nomme *secondaire* est proportionnelle à l'intensité du courant, tandis que l'élévation de température primaire qui a lieu dans le conducteur entier par l'effet de sa résistance, est proportionnelle au carré de l'intensité du courant. Aussi cette dernière température varie-t-elle d'une manière très-prononcée avec l'épaisseur des barreaux métalliques, tandis que la température secondaire est presque indépendante de cette épaisseur. C'est ce qui fait que pour se mettre à l'abri de la première et bien étudier l'effet de la seconde, il vaut mieux se servir de barreaux épais pour former les croix plutôt que de barreaux minces, qui d'ailleurs donnent des résultats moins constants, parce que leur défaut d'homogénéité exerce une influence proportionnellement plus considérable.

M. Frankenheim, en employant des barreaux métalliques de nature diverse, a bien constaté que la température secondaire ne dépend pas, comme l'avait cru Peltier, de la conductibilité des métaux, mais de leur propriété thermo-électrique. Il a trouvé même que les divers métaux, dans leur aptitude à engendrer la chaleur secondaire, suivent le même ordre que dans la production des courants thermo-électriques, de telle façon que le bismuth et l'antimoine sont aux extrémités de la série et le cuivre au milieu. Or comme cette chaleur secondaire produit la thermo-électricité, il en résulte que si on a deux com-

binaisons dont les pouvoirs thermo-électriques soient $= m : n$, on aura aussi que les variations de température secondaire produites par le même courant qui les traverse toutes les deux seront entre elles $= m : n$. Mais si les différences de température aux points de soudure étaient les mêmes pour les deux combinaisons, on aurait que les intensités de leurs courants thermo-électriques seraient entre elles $= m : n$; or ces différences de température, au lieu d'être égales, étant elles-mêmes $= m : n$, il en résulte nécessairement que les intensités des deux courants thermo-électriques sont entre elles $= m^2 : n^2$. Cette loi importante a été vérifiée par M. Frankenheim, qui a également étudié la réaction que le courant secondaire, qui est produit par le réchauffement ou le refroidissement au point de soudure, doit exercer sur le courant même de la pile. Il n'en résulte pour ce courant aucun affaiblissement, si l'interposition d'un métal dans le circuit formé d'un autre détermine à ses deux points de contact deux courants égaux et contraires; tel est le cas, par exemple, de l'interposition d'un barreau de bismuth entre deux conducteurs de cuivre, où la chaleur secondaire produit un réchauffement égal aux deux points de contact, et par conséquent développe deux courants thermo-électriques égaux dirigés en sens contraires, qui s'annulent. Mais, si par l'effet de l'action secondaire il y a réchauffement à l'un des points de contact et refroidissement à l'autre, ces deux courants thermo-électriques s'ajoutent, et le courant principal (celui de la pile) éprouve une diminution qui est égale au double de l'intensité du courant produit par le couple bismuth et cuivre. Peut-être est-ce à l'action de ces courants secondaires inverses du courant principal qu'on peut attribuer les différences apparentes de conductibilité de métaux qui semblent identiques. Il suffit en effet d'une légère différence dans l'état moléculaire, et de l'existence, par exemple, de petits cristaux dans la texture d'un métal, pour que le passage de l'électricité d'un de ces métaux dans un autre, disposé dans une direction divergente, fasse naître un courant thermo-électrique. C'est ce qui fait que le cuivre galvanoplastique à grain plus grossier diminue moins l'intensité du courant que le cuivre fondu à grain plus fin, qui offre au cou-

rant un plus grand nombre de passages d'un petit cristal à un autre. Le même effet se présente avec d'autres métaux, et en particulier avec le fer carbonisé où les molécules de charbon sont intimement mélangées avec celles du fer.

C'est également à une réaction produite par le courant secondaire sur le courant principal que nous devons attribuer les résultats curieux obtenus par M. Wartmann sur la diathermansie des métaux; M. Wartmann désigne ainsi la faculté que possèdent deux métaux à laisser passer de l'un à l'autre, quand ils sont en contact, un courant électrique dont l'intensité est appréciée par son effet calorifique sur l'hélice d'un thermomètre de Breguet, mise dans son circuit. Le courant lui-même était produit par un seul couple cuivre et zinc amalgamé plongé dans l'eau acidulée. Un très-grand nombre d'expériences ont montré que les couples formés de deux métaux non soudés présentent de grandes différences dans la faculté qu'ils possèdent de laisser passer le courant apprécié toujours par son effet calorifique, suivant le sens de ce courant lui-même, mais que ces différences existent surtout quand un des métaux du couple, au moins, est à texture cristalline, tandis qu'elles sont nulles quand les couples ne renferment que des métaux ductiles. Ce résultat indique bien clairement que la diminution d'intensité du courant principal provient du courant thermo-électrique développé par la chaleur secondaire que produit le passage de l'électricité au point de contact des deux métaux du couple, chaleur qui elle-même varie en intensité suivant que le courant principal passe du premier au second ou du second au premier.

M. Frankenheim, en plongeant dans un bain d'eau le point de soudure d'une croix fer et cuivre, est parvenu à déterminer la température qui produit directement dans cette combinaison un courant thermo-électrique égal en intensité à celui que développe la chaleur secondaire dégagée par un courant voltaïque d'une puissance connue. Ainsi il a trouvé que pour un courant de 45° à son galvanomètre à tangente, cette température est de 20°, et que par conséquent la chaleur secondaire produite au point de soudure doit être aussi de 20°.

Nous ne nous arrêterons pas pour le moment aux idées théoriques de M. Frankenheim qui estime que dans une chaîne thermo-électrique dont tous les points de soudure ont une température uniforme, il existe par l'effet de cette température des courants égaux et contraires qui se neutralisent, qu'il suffit d'une inégalité de température entre quelques points de soudure pour déterminer la supériorité d'un ou de plusieurs courants dirigés dans un sens sur ceux dirigés dans l'autre. Dans ce point de vue, la véritable électricité de contact serait celle déterminée par les métaux dans l'ordre de leur thermo-électricité et non pas dans l'ordre de leur tension voltaïque. Nous reviendrons sur ce point quand nous aurons achevé l'étude des sources électriques. Pour le moment nous nous bornerons à constater le fait bien établi par M. Frankenheim de la liaison intime qui existe entre la température secondaire développée au point de contact de deux métaux par le passage d'un courant électrique, et le pouvoir thermo-électrique de ces métaux. Or, comme il est bien prouvé par les expériences de Swanberg, de Frantz, de Matteucci et de Magnus, que la thermo-électricité dépend de la constitution moléculaire des corps et qu'elle est un résultat de la perturbation apportée dans cette constitution par le mouvement de la chaleur, il en résulte que les changements secondaires de température déterminés dans le point de contact de deux conducteurs hétérogènes par le passage du courant, sont également dépendants de cette constitution moléculaire et du trouble que le courant y apporte.

Si nous rapprochons maintenant les uns des autres tous les phénomènes qui lient ensemble l'électricité et la chaleur, nous en voyons partout ressortir l'influence moléculaire. La production de la chaleur primaire qui résulte du passage du courant à travers un conducteur qui lui présente une résistance, est évidemment due aux mouvements moléculaires que ce passage détermine, mouvements dont l'existence devient visible pour peu qu'il y ait de solution de continuité dans le conducteur, comme dans l'expérience de l'arc voltaïque, et qui n'en est pas moins sensible dans les conducteurs continus par l'altération que ces conducteurs éprouvent dans leur état moléculaire

quand ils ont transmis longtemps un courant [1]. Nous venons de constater que la production de la chaleur secondaire aux points de contact, qui engendre la thermo-électricité, est aussi éminemment dépendante de la structure moléculaire. Mais le point difficile à résoudre, c'est de déterminer les lois qui lient les mouvements moléculaires, soit avec l'électricité, soit avec la chaleur. Il faudrait pour cette détermination opérer avec les corps conducteurs, comme avec ceux qui ne le sont pas, sur des cristaux parfaitement réguliers et déterminés, et non pas sur des masses amorphes formées de métaux plus ou moins irrégulièrement agglomérés. Nous avons exposé les tentatives faites par Swanberg et par Frantz dans ce sens; mais elles sont encore insuffisantes. Quoi qu'il en soit, il est évident que les effets électriques que produit le mouvement de la chaleur dans les cristaux sont exactement du même ordre que ceux que ce mouvement produit dans les métaux, et que la différence dans le mode de manifestation de l'électricité tient à la différence de conductibilité.

Maintenant si nous revenons à l'idée que nous avons émise, que les atomes ont une polarité électrique qu'ils doivent à un mouvement de rotation plus ou moins rapide autour d'un axe; si, conformément aux théories mécaniques actuelles sur la chaleur, nous admettons que la chaleur augmente ce mouvement de rotation et accroît par conséquent en même temps la polarité électrique, nous pouvons nous rendre compte d'une manière assez satisfaisante de ce qui se passe dans les phénomènes électro-calorifiques. Nous l'avons déjà dit, le passage du courant, en augmentant la polarité des atomes, doit accroître leur vitesse de rotation et élever la température; à son tour, la propagation de la chaleur augmente leur vitesse de rotation et

[1] Tout dernièrement un jeune physicien suisse, M. Dufour, de Lausanne, a démontré que le passage prolongé d'un courant, produit par un seul couple, peut déterminer un changement tel dans un fil de cuivre que, même après que le passage de ce courant a cessé, la ténacité de ce fil a diminué de plus d'un quart de sa ténacité primitive. M. Adie a également remarqué un changement moléculaire remarquable qui se produit au point de contact des couples thermo-électriques qui ont été longtemps en activité.

doit augmenter leur polarité électrique. Si dans ce dernier cas les atomes sont parfaitement libres de se mouvoir dans tous les sens, il ne doit y avoir aucun effet électrique extérieur, parce que les électricités polaires des atomes se neutralisent mutuellement, qu'elles soient exaltées ou non par la chaleur, puisque jamais il n'y a plus d'électricité d'une espèce que d'une électricité de l'autre, quelle que soit leur intensité absolue; c'est ainsi que les choses se passent dans les liquides et dans les métaux très-ductiles. Mais si les atomes sont groupés de manière à donner au corps une structure plus ou moins cristalline, c'est-à-dire non uniforme dans toutes les directions, il doit en résulter que, lorsque la chaleur en se propageant exalte la polarité électrique de certains atomes, ceux-ci n'étant pas susceptibles de se mouvoir librement et par conséquent d'affecter une disposition qui rétablisse l'équilibre électrique, la molécule intégrante qu'ils forment se trouve avoir une polarité électrique dans une certaine direction, et une polarité contraire dans l'autre. Tous les phénomènes pyro-électriques des cristaux montrent en effet que c'est à la différence de structure moléculaire, qu'est due l'apparition de l'électricité positive à une place et de la négative à une autre. Quant au fait que les deux électricités changent de place quand le refroidissement succède au réchauffement, il tient à la manière dont se groupent les atomes de la molécule, suivant qu'ils reçoivent ou émettent la chaleur, c'est-à-dire qu'ils sont plus ou moins chauds, et par conséquent doués d'une polarité électrique plus ou moins forte. Nous reviendrons sur ce point particulier qui a besoin d'être éclairci, quand nous aurons achevé l'examen de toutes les causes qui donnent naissance au dégagement de l'électricité.

Les propriétés thermo-électriques des métaux liées comme celles des cristaux à la structure moléculaire, se manifestent sous forme de courant à cause de la conductibilité, mais elles proviennent également de l'état polaire de chaque molécule intégrante, état exalté par la chaleur et qui ne produit aucun effet extérieur que lorsqu'il y a mouvement de la chaleur, c'est-à-dire différence de température entre les molécules consécu-

tives. Le principe fondamental dans tout cet ordre de phénomènes aussi bien pour les corps conducteurs que pour les corps isolants, c'est que l'état électrique qu'acquiert la masse, n'est que le résultat de l'état électrique de chacune des molécules intégrantes de cette masse, d'où résulte, suivant la manière dont ces molécules sont disposées les unes à l'égard des autres, des manifestations électriques différentes.

Quant aux phénomènes de température secondaire que détermine un courant en passant d'un métal à l'autre, leur liaison avec la propriété thermo-électrique des deux métaux en contact montre qu'ils sont dépendants, comme cette propriété, de la constitution moléculaire des corps et des perturbations que le passage du courant y détermine. Nous avons déjà fait remarquer [1] que, si l'on part de l'hypothèse que les atomes sont doués d'un mouvement rapide de rotation autour d'un axe, cause à la fois de leur température et de leur polarité électrique, il peut arriver que cette polarité naturelle soit en accord ou en désacord avec la polarité artificielle que détermine le passage du courant. Dans le premier cas le mouvement doit être accéléré et la température s'élever, tandis que dans le second elle s'abaisse, le mouvement de rotation devant diminuer. Mais il faut, pour que ces différences soient sensibles, que le courant ne soit pas trop fort, car pour peu qu'il ait d'intensité, la rotation imprimée aux atomes par la polarité artificielle l'emporte trop sur celle qui produit la polarité naturelle, pour qu'il n'y ait pas en tout cas accélération de mouvement et par conséquent toujours chaleur, seulement un peu plus ou un peu moins considérable, suivant que les polarités s'accordent ou ne s'accordent pas.

Les expériences de Peltier et celles de Frankenheim sont tout à fait d'accord avec cette manière de se rendre compte de cet ordre de phénomènes. Ainsi, d'après Peltier, quand le courant passe du fer au zinc, la température s'élève de 30°; quand il passe du zinc au fer, seulement de 13°; quand il passe du zinc au cuivre, elle s'élève de 26°, et quand c'est du cuivre au zinc

[1] Tome II, pages 246 et 247.

de 14°. Mais la différence est bien plus marquée quand les deux métaux en contact, ou du moins l'un des deux, ont une structure cristalline bien prononcée. Ainsi une lame de bismuth soudée à une lame de cuivre donne avec un courant d'une intensité croissante dirigé du bismuth au cuivre, les résultats suivants :

Intensité du courant.	Température produite au point de contact.
15°	— 2°,5
20°	— 4°,5
28°	— 4°,5
30°	0°
35°	+ 4°,05

Si le courant est dirigé du cuivre au bismuth, on a au point de contact une température qui s'accroît de 10° à 50° à mesure qu'augmente l'intensité du courant. Il est évident que jusqu'au courant d'une intensité de 30°, l'effet du passage de l'électricité est une diminution du mouvement rotatoire naturel des atomes, puisqu'il y a abaissement de température, mais qu'à partir de cette intensité de 30°, le mouvement rotatoire imprimé aux atomes par le courant est assez fort pour compenser et au delà cette diminution. Une lame d'antimoine soudée à une lame de cuivre présente un phénomène inverse ; l'abaissement de température a lieu quand le courant passe du cuivre à l'antimoine, et l'élévation quand il passe de l'antimoine au cuivre. C'est ce qui fait que l'association de l'antimoine et du bismuth produit le maximum d'effet.

Mais sans entrer dans aucune hypothèse sur la cause de la polarité atomique et de la température, on peut cependant trouver une grande analogie entre les phénomènes électrothermiques et ceux que présente simplement la chaleur. C'est ce qu'a montré M. Clausius dans un travail théorique sur l'application de la théorie mécanique de la chaleur aux phénomènes thermo-électriques, qui, se rattachant aux notions les plus transcendantes de mécanique rationnelle et d'analyse, ne peut trouver place dans un ouvrage du genre de celui-ci. Nous nous

bornerons à signaler comme conséquence de ce travail l'analogie qu'établit son auteur entre une chaîne thermique et une machine mue par la chaleur. Partant du fait expérimental que d'une part, dans un couple thermo-électrique de bismuth et d'antimoine, le courant passe au point de contact chauffé du bismuth à l'antimoine, et au point de contact refroidi de l'antimoine au bismuth, et que d'autre part un courant extérieur qui traverse le couple anéantit de la chaleur dans la première direction et en produit dans la seconde, il en conclut que le point de contact maintenu chaud correspond à la partie chauffée de la machine calorique, et le point de contact maintenu froid au condensateur. Puis appliquant à ces considérations la loi de Carnot, il en déduit la correspondance entre les états électriques et les variations de température.

Il nous paraît qu'on peut comparer ce qui a lieu dans ce cas avec ce qui se passe avec un fluide élastique. Si on le chauffe il produit par son augmentation d'élasticité un travail mécanique; mais s'il produit ce travail mécanique par sa simple dilatation, il se refroidit en absorbant une quantité de chaleur équivalente à ce travail. De même, si on chauffe le point de contact des deux métaux, il se produit un travail mécanique moléculaire qui détermine un courant; mais si on produit ce même courant autrement qu'en chauffant, cette production détermine un travail moléculaire qui absorbe de la chaleur et par conséquent occasionne un refroidissement. L'inverse serait également vrai et il y aurait des conséquences intéressantes à tirer de la comparaison des deux cas, de celui où il y a réchauffement et de celui où il y a refroidissement, quant à la nature du travail qui accompagne le passage du courant.

Clausius remarque encore que les effets thermo-électriques n'ont pas lieu seulement aux points de contact des diverses substances, mais qu'un courant électrique produit des effets thermiques différents dans un même métal, suivant qu'il marche du chaud au froid ou du froid au chaud; ce qui revient à dire que dans l'intérieur d'un même métal dont les diverses portions se trouvent être à des températures diffé-

rentes, la chaleur a la tendance de pousser l'électricité dans une direction déterminée, aussi bien que dans deux métaux en contact. Ajoutons qu'il considère bien, comme nous l'avons fait nous-même, la manifestation de l'état électrique dans l'intérieur d'un même métal, non comme un effet direct, mais seulement comme un effet secondaire de la différence de température, c'est-à-dire comme le résultat d'un changement produit par la chaleur dans l'état moléculaire. Il rappelle en faveur de cette opinion et les expériences de Magnus et celles qui démontrent que les courants thermo-électriques qu'on détermine dans un barreau d'un seul métal sont dus à des différences de cristallisation dans son intérieur.

A l'appui de cette manière de voir, nous citerons encore M. Thomson, qui s'est beaucoup occupé de l'application de la théorie mécanique de la chaleur aux phénomènes thermo-électriques que présentent les métaux cristallisés, et qui est arrivé, par la comparaison avec ce qui se passe dans d'autres phénomènes, à conclure que la pression ou la tension doivent développer dans une masse métallique homogène les propriétés thermo-électriques des cristaux. Ainsi il a trouvé qu'un fil de cuivre tendu au moyen d'un poids présente, par rapport au même fil non tendu, des relations thermo-électriques exactement semblables à celles que Svanberg a établies entre un barreau taillé dans un cristal de bismuth ou d'antimoine perpendiculairement à l'axe, et un barreau taillé dans le sens de cet axe. Si donc dans une partie du circuit, le fil de cuivre est tendu par un poids considérable, les autres parties du fil restant à leur état naturel, et si l'une des extrémités de la partie tendue est échauffée, il s'établit un courant de la partie tendue à la partie non tendue à travers le point de jonction chauffé; et si le fil est tendu et détendu alternativement des deux côtés de la partie échauffée, le courant est renversé instantanément à chacune de ces alternatives de tension.

Il demeure donc évident pour nous, que la propagation de la chaleur n'est qu'un moyen de déterminer des changements moléculaires qui donnent naissance aux manifestations électriques, comme la propagation de l'électricité n'est à son tour qu'un

moyen de produire des perturbations dans l'état des particules, qui entraînent une rupture dans l'équilibre de la température. Nous essayerons plus loin de pénétrer plus avant dans la nature de ces changements et de ces perturbations qui probablement ne sont, comme nous l'avons déjà dit, que des modifications apportées au mouvement rotatoire naturel et à la position relative des atomes, d'où découlent également les phénomènes que présentent les corps tant sous les rapports électrique et magnétique, que sous le rapport chimique.

Liste des principaux travaux relatifs aux sujets traités dans ce chapitre :

Becquerel. — Électricité de la tourmaline, etc. — *Ann. de ch. et de phys.* T. XXXVII, p. 5 et 355. — Courants thermo-électriques. — *Idem.* T. XXIII, p. 131, et t. XXXI, p. 371 ; t. XXXVII, p. 328, et t. XLI, p. 353.

Brewster. — Minéraux pyro-électriques. — *Ann. de ch. et de phys.* T. XXVIII, p. 161.

Hauy. — *Idem.* — *Ann. de ch. et de phys.* T. I, p. 447.

Riess et *Rose.* — Pyro-électricité des minéraux. — *Arch. de l'électricité.* T. III, p. 585.

Forbes. — *Idem.* — *Trans. of the royal Society of Edinburgh.* T. XIII, (1832).

Seebeck. — Courants thermo-électriques. — *Ann. de ch. et de phys.* T. XXII, p. 199.

Yelin. — *Idem.* — *Bibl. univ.* (1823). T. XXIII, p. 38, et t. XXIV, p 253.

Sturgeon. — *Idem.* — *Bibl. univ.* (1831). T. XLVII, p. 351, et t. XLVIII, p. 1.

Cumming. — Rotation thermo-électrique. — *Bibl. univ.* (1824). T. XXV, p. 108.

Matteucci. — Expériences diverses thermo-électriques. — *Bibl. univ.* (*Nouvelle série*). T. XII, p. 211 ; t. XIII, p 199 ; t. XV, p. 187 ; t. XVIII, p. 353 ; et t. XVIII, p. 410. — *Arch. de l'électricité.* T. II, p. 227, et t. III, p. 666. — *Comptes rendus de l'Acad. des sciences* (1855). T. XL, p. 541.

Vorsselmann de Heer. — Courants thermo-électriques du mercure. — *Arch. de l'Électricité.* T. I, p. 581.

Gaugain. — Courants thermo-électriques. — *Arch. des sc. phys.* (*Bibl. univ.*). T. XXIII, p. 69.

Swanberg. — Influence de la cristallisation sur les courants thermo-électriques. — *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, du 19 août 1850, et *Arch. des sc. phys.* T.XV, p. 128.

Frantz. — *Idem.* — *Ann. der physik.* T. LXXXIII, p. 374, et *Arch. des sc. phys.* (*Bibl. univ.*). T. XVIII, p. 297.

Mousson. — Influence de l'état moléculaire sur les courants thermo-électriques. — *Arch. de l'électricité.* T. IV, p. 5.

Digitized by Google

Magnus. — *Idem.* — *Ann. de ch. et de phys.* (*Nouvelle série*). T. XXXIV, p. 105.

Fourrier et *Oersted.* — Pile thermo-électrique. — *Ann. de ch. et de phys.* T. XXII, p. 201 et 373.

Pouillet. — Théorie de la pile thermo-électrique et mesure des températures. — *Traité de physique.* — *Comptes rendus de l'Acad. des sciences.* T. III, p. 782, et t. IV, p. 785.

Bolto. — Pile thermo-électrique à grande résistance. — *Bibl. univ.* (1832). T. LI, p. 337.

Poggendorff. — *Idem.* — *Bibl. univ.* (*Nouvelle série*, 1840). T. XXX, p. 215. — *Ann. de ch. et de phys.* T. LXXV, p. 333.

Nobili. — Courants thermo-électriques. — *Bibl. univ.* (1828). T. XXXVII, p. 119. — Application de la pile thermo-électrique à la mesure des températures. — *Bibl. univ.* (1830). T. XLIV, p. 225, et t. LVII (1834), p. 1.

Melloni. — *Idem.* — *Ann. de ch. et de phys.* T. XLVIII, p. 198, et t. LIII, p. 5.

Regnault. — *Idem.* — *Arch. des sc. phys.* (*Bibl. univ.*). T. XI, p. 265, et *Mémoires de l'Acad. des sciences de Paris.*

Becquerel et Breschet. — *Idem.* — *Ann. de ch. et de phys.* T. LIX, p. 113.

Peltier. — Pince thermo-électrique et froid produit par le courant électrique. *Ann. de ch. et de phys.* T. LVI, p. 371, et t. LXXI, p. 225.

Wartmann. — Diathermansie électrique. — *Arch. de l'électricité.* T. I, p. 74.

Frankenheim. — Rapports entre les phénomènes électro-calorifiques et thermo-électriques. — *Ann. der physik.* t. XCI.

Clausius. — Application de la théorie mécanique de la chaleur aux phénomènes thermo-électriques. — *Ann. der physik.* T. XC.

Thomson. — Considérations sur les courants thermo-électriques. — *Arch. des sc. phys.* (*Bibl. univ.*). T. XXVII, p. 51, et p. 347.

CHAPITRE II.

ÉLECTRICITÉ PRODUITE PAR LES ACTIONS MÉCANIQUES.

§ 1. Développement de l'électricité par le frottement des corps solides isolants.

Nous avons déjà vu que le frottement était de toutes les manières de développer l'électricité celle qui est la plus anciennement connue. Si dans bien des cas elle semble être la source la plus énergique, cela tient à ce qu'il ne faut pas confondre l'électricité *perçue* avec l'électricité *produite*. Cette remarque s'applique également à toutes les sources d'électricité. En effet, tandis que la production de l'électricité est un effet instantané, sa perception exige un temps comparativement énorme, surtout quand il s'agit d'électricité statique. Ainsi, par exemple, après avoir frotté un corps, il faut le mettre en communication avec l'instrument destiné à accuser l'électricité qu'il a acquise, et pendant l'intervalle de temps qui sépare les deux opérations, bien des circonstances peuvent diminuer notablement et même faire disparaître entièrement les signes électriques; telles sont l'imperfection dans la faculté isolante du corps et des supports, le contact des milieux ambiants et de l'air en particulier. Et ce n'est pas dans le frottement des corps non conducteurs que la différence entre l'électricité perçue et l'électricité produite est la plus grande; nous verrons au contraire que si l'on voulait, par exemple, conclure des signes électriques manifestés par le frottement de deux corps, comparés à ceux qui sont produits dans bien des cas par les actions chimiques, la supériorité du premier mode d'action sur le second cas dans le développement de l'électricité, on risquerait de tomber dans de graves erreurs. Une autre remarque impor-

Digitized by Google

tante à faire et qui s'applique également à toutes les autres sources de l'électricité, mais dont l'importance est plus grande quand il s'agit des actions mécaniques où souvent on n'aperçoit qu'une seule des électricités, c'est que jamais l'un des principes électriques n'est dégagé sans que l'autre ne le soit également et en même proportion. Cette loi énoncée pour la première fois par Wilke est générale, et les exceptions apparentes qu'elle présente cèdent devant une observation plus attentive des faits. Ainsi Bergmann avait remarqué que deux plumes d'oie frottées l'une contre l'autre se constituaient toutes les deux dans un état positif, et Faraday, que deux bandes de flanelle frottées l'une contre l'autre en croix se constituaient négatives. Dans ces expériences, il y a évidemment disparition par le frottement d'une couche superficielle très-mince des deux substances en contact, qui emporte avec elle l'électricité contraire à celle qui reste sur les corps. Du reste, l'exception apparente dont nous venons de parler ne s'est jamais présentée que dans le frottement de deux corps semblables.

Abordons maintenant l'étude des phénomènes électriques qui accompagnent le frottement. Il faut dans ce but distinguer deux espèces de frottement, celui que nous pouvons appeler de *roulement*, dans lequel, comme dans le cas des deux cylindres d'un laminoir, un même point d'une surface n'est touché que par un point de l'autre sans venir en contact avec un second, et le frottement de *glissement* dans lequel au contraire chaque point d'une surface est successivement en contact avec plusieurs points de l'autre. C'est de ce dernier qu'il sera question toutes les fois que nous ne dirons pas le contraire. Lorsque les deux surfaces qu'on frotte l'une contre l'autre sont inégales, nous appelons *frottée* la plus grande et *frottante* la plus petite; c'est celle par conséquent dont chaque point est le plus frotté. Il y a encore le frottement *central*, qui est celui qu'on obtient en mettant deux disques de même grandeur en rotation en sens contraire autour d'un axe commun en ayant soin qu'ils soient en contact. Quand les corps frottés sont deux morceaux d'une même substance telle que la résine, le verre, la flanelle, la soie, le velours, le liége, etc., on remarque que,

sauf les rares exceptions que nous avons signalées plus haut, l'un des morceaux prend l'électricité positive et l'autre la négative; c'est ce qu'on constate facilement au moyen de l'électroscope à piles sèches. Bergmann a observé que quand on frotte deux bandes de verre de manière que toutes les parties de l'une passent seulement sur une partie de l'autre, la frottée est négative et la frottante positive; c'est l'inverse si la bande frottée est chaude. Deux lames de verre de même grandeur tenues par des manches et frottées l'une contre l'autre de haut en bas, présentent un état identique; dans chacune la moitié supérieure est positive et la moitié inférieure négative. Deux rubans frottés l'un contre l'autre, transversalement comme les deux lames, sont le frotteur négatif et le frotté positif; c'est l'inverse du verre; un ruban usé frotté contre un ruban neuf est également négatif. La chaleur tend à donner au ruban auquel on l'applique la propriété négative. Il est probable que c'est au plus grand réchauffement que le ruban frotteur doit d'être négatif. Une chose assez remarquable est que si l'on recouvre un cylindre de verre d'une substance, et qu'on le frotte avec une substance semblable, c'est toujours, quelles que soient les circonstances qui accompagnent le frottement, celle qui recouvre le cylindre qui est positive.

Nous n'insisterons pas sur les effets de frottement dans le cas où les substances frottées sont semblables, mais diversement colorées, car au fond les substances ne sont plus exactement semblables, puisqu'elles renferment un principe colorant différent; nous passerons donc immédiatement au cas du frottement opéré entre les substances dissemblables. Nous ne pouvons mieux faire que de rapporter sur ce point les expériences intéressantes de Coulomb, telles que M. Biot, qui les a tirées d'un manuscrit de cet habile physicien, les a consignées dans son traité de physique expérimentale et mathématique. Une bande de papier, dans son état naturel, étant chargée de l'humidité de l'air, ne prend par le frottement qu'un faible degré d'électricité. Mais si on la fait sécher et chauffer, contre quelque corps qu'on la frotte ensuite, elle donnera des signes sensibles d'électricité. Une bande de papier chauffée et frottée

contre une étoffe de laine blanche prend toujours l'électricité négative. Cette même bande frottée contre du métal prend toujours l'électricité négative, à moins que le métal n'ait un grand degré de poli. Dans ce cas, elle donne quelquefois des signes d'électricité positive très-faibles. La bande de papier étant séchée et chauffée, si on la frotte contre une étoffe de soie blanche, elle donne des signes d'électricité négative; mais lorsque la chaleur est passée, elle donne le plus souvent des signes d'électricité positive très-faibles. La bande de papier chauffée et frottée contre une étoffe de soie noire, *neuve* et de bon teint, donne des signes d'électricité positive. La bande de papier chauffée et frottée contre une étoffe noire *demi-usée* prend, lorsqu'elle est encore chaude, une électricité négative; quelques instants après, frottée de nouveau, elle ne donne aucun signe d'électricité; mais frottée quelques instants encore après, elle donne des signes d'électricité positive. Un ruban de soie blanche, chauffé et frotté contre du métal, donne toujours des signes d'électricité négative. En le laissant refroidir et le frottant de nouveau, si le métal contre lequel on le frotte n'est pas très-poli, il continuera à donner des signes d'électricité négative; mais si le métal a un très-grand degré de poli, il donnera des signes d'électricité positive très-faibles. Ainsi, par exemple, notre ruban refroidi, étant frotté contre un papier doré ou argenté qui ait un très-grand poli, acquerra toujours l'électricité positive; mais si le ruban est échauffé, il donnera toujours des signes d'électricité négative. Il donnera également toujours des signes d'électricité négative, soit qu'il soit chauffé ou non, lorsqu'on le frottera contre l'arête d'un vase, ou contre un corps métallique qui n'aura pas un grand degré de poli, ou même contre un morceau de clinquant; mais si on le frotte contre une partie du vase qui soit très polie, il prendra alors l'électricité positive. Un ruban noir, chauffé ou non, mais soyeux et de bon teint, étant frotté contre un métal poli ou dépoli, donne toujours des signes d'électricité négative. Lorsque le ruban est peu soyeux, que la teinture est faible, il donne quelquefois des signes d'électricité positive dans les mêmes cas que le ruban blanc. Un ruban de soie

blanche chauffé ou non, et frotté contre une étoffe noire et d'un bon teint, donne toujours des signes d'électricité positive; mais si l'étoffe noire contre laquelle on frotte le ruban blanc est usée, et que le ruban blanc soit chauffé, il donnera des signes d'électricité négative, et en se refroidissant, il donnera ensuite des signes d'électricité positive. Une étoffe de soie, agitée dans l'air avec un mouvement rapide, prend toujours l'électricité négative; en sorte que le frottement de l'air contre la soie donne à l'air une électricité positive. Un ruban blanc de laine produit à peu près les mêmes phénomènes électriques qu'un ruban de soie et une bande de papier; si on le frotte sans le faire chauffer, ou après qu'il est refroidi, contre une surface métallique très-polie, comme le papier doré ou argenté, ou même contre le côté d'un vase de métal très-poli, il donnera des signes d'électricité positive; si l'on fait chauffer le ruban de laine avant de le frotter, il donnera dans tous les cas des signes d'électricité négative; il donnera les mêmes signes d'électricité négative, si on le frotte sans le faire chauffer contre une surface métallique qui n'aurait pas un très-grand degré de poli.

Un ruban de soie, une bande de papier, un ruban de laine, frottés contre une peau garnie de son poil, telle qu'une queue de renard ou une peau de chat bien sèche, prennent toujours l'électricité négative, et dans un plus grand degré que contre toute autre espèce de frottoir. L'on sait que les peaux garnies de leurs poils, frottées du côté du poil sur un corps conducteur, prennent toujours l'électricité positive.

Toutes les particularités de ces phénomènes semblent pouvoir se ramener à un principe général que voici :

Lorsque les surfaces de deux corps sont frottées ensemble, celle dont les particules intégrantes s'écartent le moins les unes des autres, et font des excursions moindres autour de leurs positions naturelles d'équilibre, paraît, par cela même, plus disposée à prendre l'électricité positive; cette tendance augmente si la surface éprouve une compression passagère. Réciproquement celle des deux surfaces, dont les particules se trouvent plus écartées par la rudesse de l'autre ou par toute autre cause

quelconque, est, par cela même, plus disposée à prendre l'électricité négative. Cette tendance augmente si la surface éprouve une véritable dilatation. Plus cette opposition de circonstances est forte, plus le développement de l'électricité est énergique sur les deux surfaces. Il s'affaiblit à mesure que leur état devient plus semblable. Une égalité parfaite le rendrait nul, si elle pouvait exister.

Ainsi, lorsqu'une substance animale ou végétale solide et sèche est frottée contre une surface métallique qui a de la rudesse, elle donne des signes d'électricité négative; c'est le cas où ses molécules sont écartées. Lorsqu'elle est frottée contre un métal très-poli qui altère peu sa surface, ou dont l'effet se borne à la comprimer par parties, sans écarter individuellement les particules qui la composent, elle ne donne aucun signe d'électricité, ou elle donne des signes d'électricité positive. La chaleur dilatant les pores des corps, agit sur leur surface comme ferait un frottoir plus rude. Elle la dispose donc à prendre l'électricité négative.

Lorsqu'on frotte les poils d'une peau de chat contre une surface métallique polie ou dépolie, ils ne peuvent que céder à son choc et se refouler les uns sur les autres; mais ils se compriment ainsi, tout d'une pièce, sans aucune vibration de leurs particules. Ils sont donc disposés d'une manière éminemment favorable pour prendre l'électricité positive, comme en effet on voit qu'ils l'acquièrent, puisqu'après le frottement le métal se trouve toujours avoir l'électricité négative. Mais employez ces mêmes poils à former le tissu d'une étoffe, ce qui exigera qu'ils soient foulés, comprimés et serrés sur eux-mêmes; alors si vous les frottez contre une surface métallique dépolie, ils n'en seront pas seulement pressés et comprimés comme auparavant; ils seront au contraire séparés et déchirés par les aspérités de cette surface. Ainsi ils devront prendre l'électricité négative, comme en effet on voit aussi qu'ils la prennent, excepté dans le cas où la surface métallique contre laquelle on les frotte a un certain degré de poli.

En général, lorsque l'un des corps frottés est un tissu de fibres animales ou végétales serrées les unes sur les autres, tel

qu'un ruban de soie, une étoffe de laine ou un morceau de papier sec, le meilleur frottoir doit être celui sur lequel ces tissus ne peuvent produire qu'une compression générale et passagère. Aussi l'expérience apprend-elle que, dans ce cas, rien n'est préférable à une peau garnie de son poil.

Mais lorsque des substances animales ou végétales, frottées l'une contre l'autre, se dilatent toutes les deux dans le frottement, l'espèce d'électricité que prend chacune d'elles dépend de l'élargissement plus ou moins considérable que ses pores reçoivent; et alors les plus légères modifications, dans l'état de l'une ou de l'autre surface, peuvent déterminer des résultats opposés. Par exemple, lorsqu'on frotte une étoffe de soie blanche contre un morceau de papier sec, la soie prend ordinairement l'électricité négative. Elle paraît donc alors avoir plus de tendance pour cette espèce d'électricité. Mais si l'on commence par ouvrir les pores du papier en le chauffant, cette préparation le rend plus apte à son tour à prendre l'électricité négative, et la soie frottée contre lui devient positive. Cette faculté, que la chaleur avait exaltée, diminue à mesure que le papier se refroidit et que ses pores se resserrent. Il vient un moment où elle est seulement égale à celle de la soie. A cette époque, le frottement de ces deux corps ne produit aucun signe d'électricité sensible. Passé cet instant, la bande de papier continuant à se refroidir, et ses pores à se resserrer, sa tendance à prendre l'électricité négative s'affaiblit toujours, tandis que celle de la soie blanche reste la même. Alors cette dernière n'étant plus contre-balancée par l'état de la bande de papier, il arrivera souvent que la soie prendra une électricité négative, et donnera par conséquent au papier une électricité positive.

Les mêmes considérations peuvent s'appliquer à une étoffe de soie blanche frottée contre une étoffe de soie noire. Soit que la teinture noire donne de la rudesse à la surface des étoffes de soie ou de laine, de manière que, dans le frottement, leurs pores se trouvent plus écartés que ceux des étoffes qui ne sont pas teintes, soit que la réunion des parties colorantes avec la soie augmente, sous le même degré de frottement et de dilatation, la tendance à prendre l'électricité négative, il est de fait qu'une

étoffe de soie noire *neuve* de forte teinte, étant frottée contre un ruban de soie blanche, prend toujours cette espèce d'électricité. Mais lorsque l'étoffe noire est usée et sa couleur affaiblie, si l'on dilate les pores du ruban blanc par la chaleur, il acquiert à son tour, pour l'électricité négative, une plus grande tendance que l'étoffe noire, et par conséquent il la rend positive. Cette disposition, comme on doit s'y attendre, s'évanouit avec la cause accidentelle qui la produisait, et le ruban blanc refroidi acquiert de nouveau l'électricité positive. La teinture noire produit sur la laine le même effet que sur la soie. Un ruban blanc sec, frotté contre une étoffe de laine blanche, donne toujours des signes d'électricité négative, mais contre une étoffe de laine teinte en noir, il donne des signes d'électricité positive.

Les bois bien secs sont tous négatifs quand ils sont frottés avec de la cire; mais quand ils sont frottés les uns contre les autres, ce sont en général les plus denses qui sont négatifs, et les plus légers positifs; ainsi l'ébène est négatif avec tous les autres bois.

Parmi les substances non conductrices, celle dont l'étude au point de vue de l'électricité qu'y développe le frottement est la plus importante et a été l'objet de plus de travaux, est sans contredit le verre qui présente sous ce rapport des particularités remarquables tenant aux variations nombreuses de l'état de sa surface et à son peu d'homogénéité.

Les propriétés électriques du verre sont en effet intimement liées avec l'état de sa surface; quand cette surface est fraîche, c'est-à-dire que le verre a été récemment fabriqué, il n'est pas fortement électrique, ce qui fait qu'il n'est pas propre à la construction des machines électriques. Cette absence de vertu électrique tient à sa conductibilité, mais elles disparaissent l'une et l'autre avec le temps. Le verre poli et ancien est positif avec la plupart des corps, tandis que le verre mat ou dépoli est négatif quand on le frotte avec la laine, les plumes, le bois, le papier et la main, corps avec lesquels le verre poli est lui-même négatif. Mais le verre mat est positif comme le verre poli avec la cire, le soufre, les métaux, etc. Il va sans dire que

lorsqu'on frotte l'un contre l'autre le verre poli et le verre dépoli, le premier est positif et le second négatif. Quoiqu'en général l'état variable de la surface du verre puisse être reconnu par des différences dans son pouvoir conducteur, il est cependant des cas où il n'en est pas ainsi. Il existe, suivant Henrici, des différences dans le pouvoir électrique de la surface du verre qui ne peuvent ni être aperçues à la vue, ni se démontrer par un changement dans le pouvoir conducteur. Tel est le cas des deux moitiés d'une tige de verre, dont l'une a été exposée à la flamme d'une lampe d'alcool et l'autre est restée intacte. La moitié qui a été chauffée se trouve être fortement négative quand on la frotte avec de la cire ou avec du cuir, tandis que l'autre est positive. Un frottement très-prolongé ou très-vif, l'immersion dans l'alcool ou dans une solution de potasse, restitue au verre qui l'avait perdue sa vertu positive; toutefois, si on ne lui fait subir aucune opération de ce genre, il peut conserver pendant des jours et des semaines sa propriété négative. Le cristal de roche éprouve dans les mêmes circonstances la même altération que le verre dans ses propriétés électriques.

On peut même rendre le verre susceptible de prendre l'électricité négative quand on le frotte, en le plongeant dans un acide et en le laissant sécher après l'avoir lavé préalablement dans l'eau distillée. L'immersion dans un alcali ne produit pas le même effet.

Il est évident que l'action de la flamme consiste à déterminer une altération dans l'état de la surface, puisque les moyens mécaniques détruisent l'effet de cette action. Ce n'est point un résultat de l'action directe de la chaleur, car des tiges de verre qu'on expose à la même température, en ayant soin de les enfermer dans des tubes de métal de manière à éviter qu'elles soient en contact immédiat avec la flamme, n'éprouvent aucune modification dans leurs propriétés électriques. Ce n'est pas non plus un effet de l'action qu'exerceraient sur le verre les produits de la combustion, tels, en particulier, que la vapeur d'eau ou l'acide carbonique; car en laissant agir à une haute température ces produits tout formés, on n'obtient point le même résultat. Il est donc probable que c'est dans l'acte même

de leur formation à la surface du verre qu'ils agissent sur cette surface.

Du reste, ce n'est pas seulement dans ses propriétés électriques que le verre éprouve une altération par la modification de la surface. Lœvell et Liebig ont démontré qu'un bâton de verre peut perdre par son réchauffement la faculté qu'il possède dans son état naturel de faire cristalliser instantanément une dissolution concentrée de sulfate de soude dans laquelle on le plonge. Cette même dissolution cristallise immédiatement quand on la met en contact avec une partie du bâton de verre qui n'a pas été chauffée. La partie du bâton qui était devenue inactive peut rester plusieurs jours dans cet état; l'immersion dans l'eau suivie de son desséchement dans l'air ne suffit pas pour lui rendre son activité; il faut pour cela qu'il soit exposé quelque temps à l'air libre.

Parmi les substances dont on a étudié avec soin l'électricité développée par le frottement, nous citerons un grand nombre de minéraux sur lesquels Hauy a fait de nombreuses expériences. Ce savant minéralogiste en frottait chaque échantillon avec une étoffe de laine pour déterminer s'il devenait positif ou négatif par ce frottement, et il crut trouver que le caractère électrique propre à chacune des classes dans lesquelles il groupait les minéraux sous ce rapport se rattachait à des propriétés physiques communes à toutes les espèces comprises dans la même classe. Cependant il reconnut que bien des circonstances, telles que la transparence et l'aspérité de la surface, apportent des modifications dans le caractère électrique de la même espèce minérale. Ces variations tiennent, en général, à ce que l'affaiblissement de la transparence est dû, soit au mélange d'une matière hétérogène interposée accidentellement dans la substance, soit à un dérangement de structure qui occasionne un aspect nébuleux; modifications qui entraînent, aussi bien que la perte du poli de la surface, une diminution dans la faculté isolante du corps. Ainsi, par exemple, la variété de chaux carbonatée, dite *spath d'Islande*, est transparente, très-isolante et positive, tandis que la transparence disparaît en même temps que la faculté isolante et l'électricité

positive dans la variété *saccharoïde* (marbre statuaire), qui est négative. Ainsi, même le quartz et la topaze, qui, à l'état de cristaux limpides, sont isolants et positifs, deviennent conducteurs et négatifs lorsque la surface est terne et raboteuse; mais quand on rend à ces fragments peu à peu le poli, ils reprennent par degrés les états intermédiaires par lesquels ils avaient passé, et finissent par recouvrer entièrement leurs propriétés primitives entre les mains du lapidaire. L'état des surfaces a une telle influence sur la nature de l'électricité dégagée dans le frottement des corps mauvais conducteurs, que Hauy a trouvé une substance minérale cristallisée qu'il a nommée *disthène*, qui prend, avec le même frottoir, l'électricité positive sur certaines faces et la négative sur d'autres, sans qu'on puisse découvrir de différences apparentes entre elles.

Avant de dresser la série des corps rangés dans l'ordre de la nature de l'électricité qu'ils dégagent en étant frottés les uns contre les autres, nous devons nous occuper du cas où l'un des corps frottés étant toujours un conducteur imparfait, l'autre est bon conducteur, tel qu'un métal. Cavallo, Wilson, Hauy ont fait un grand nombre de recherches sur ce point particulier. Cavallo avait trouvé que presque tous les métaux deviennent négatifs en étant frottés avec la plupart des corps, même avec la cire d'Espagne. Plus tard, Faraday avait confirmé ce résultat sur le fer, le cuivre, le laiton, l'argent et le platine; sur treize substances, avec lesquelles il les avait frottés, il n'avait trouvé que le soufre qui les rendît positifs. Hauy avait observé que, frottés avec de la cire, l'argent, le plomb, le bismuth, le zinc et le laiton sont positifs, tandis que le platine, le palladium, l'or, le nickel, le fer, l'étain, l'arsenic et l'antimoine sont négatifs.

La divergence qu'on remarque entre ces différents résultats tient à ce que, lorsqu'un des corps frottés est très-dur par rapport à l'autre, comme un métal par rapport à de la cire, il arrive souvent que le plus mou est entamé par le plus dur, et que ce dernier accuse à l'électroscope non sa propre électricité, mais celle de la couche mince de la substance qu'il enlève. J'ai signalé cette cause d'erreur en cherchant à en tenir compte

pour expliquer les anomalies que présente l'électricité développée dans les métaux frottés avec des conducteurs imparfaits, et j'ai réussi à démontrer ainsi quelle est bien la nature véritable de cette électricité.

Il suffit de placer un morceau de métal sur le plateau d'un électroscope à feuilles d'or, et de le frotter délicatement avec le doigt pour déterminer une divergence considérable des feuilles d'or, sans avoir même besoin du secours du condensateur : il faut seulement que les doigts soient très-secs pour que l'expérience réussisse bien ; on a soin de tenir avec un tube de verre bien isolant le morceau de métal pour qu'il ne glisse pas quand on le frotte. Les métaux frottés ne prennent pas tous la même électricité dans cette opération ; ainsi l'antimoine est négatif et le bismuth positif. Si l'on se sert comme corps frottants de l'ivoire, de la corne, du liége et de diverses espèces de bois, on trouve que le rhodium, le platine, le palladium, l'or, le tellure, le cobalt et le nichel acquièrent l'électricité négative, tandis que l'argent, le cuivre, le laiton et l'étain, qui sont en général aussi négatifs, se montrent quelquefois positifs, surtout l'étain ; l'antimoine, quoique le plus fortement négatif de tous, est cependant quelquefois positif; le fer et le zinc sont tantôt positifs, tantôt négatifs; enfin le plomb et le bismuth sont constamment positifs. Mais si l'on a soin de frotter le métal sur une arête vive dans un air bien sec avec du bois très-desséché et bien propre, il prend toujours l'électricité négative; par contre, quand la surface frottée est grande et que le frottoir est promené dans toute son étendue, le métal devient en général positif, surtout si on le frotte avec du liége. L'élévation de température et l'humidité favorisent dans les métaux facilement oxydables le dégagement de l'électricité positive. Il est évident que ces anomalies tiennent à ce que dans l'air, et surtout dans l'air humide et chaud, la surface de la plupart des métaux se recouvre d'une légère couche d'oxyde que le frottoir enlève, ce qui fait que ce n'est plus entre la substance du frottoir (doigt, bois, liége) et le métal, mais bien entre la couche d'oxyde qui recouvre ce frottoir et le métal, que le frottement a lieu ; de sorte que, dans ce cas, le métal prend l'électricité positive, son

oxyde se chargeant de la négative. Mais si on opère sur une partie de la surface bien décapée, et d'où il est facile d'enlever immédiatement la couche d'oxyde, comme une arête vive, alors le métal prend toujours, quelle que soit sa nature, l'électricité négative. Avec le liége et le caoutchouc, on obtient plus facilement l'électricité positive sur le métal qu'avec le bois, parce que le frottement étant plus doux, la couche d'oxyde est enlevée plus également, et reste mieux adhérente à la surface du corps frottant.

Le développement de l'électricité par le frottement des corps non conducteurs et des substances métalliques a été utilisé dans l'emploi d'un amalgame dont on recouvre les coussins des machines électriques destinés à servir de frottoirs au verre. Ces amalgames sont des amalgames d'étain, de zinc, d'étain et de zinc à la fois; quelquefois on emploie des amalgames encore plus compliqués, et même une combinaison métallique telle que l'or musif (deuto-sulfure d'étain). Wollaston avait cru que l'influence considérable que la présence de ces composés métalliques exerce sur le dégagement de l'électricité était due à une action chimique, c'est-à-dire à l'oxydation qu'éprouvent ces composés dans l'air atmosphérique. A l'appui de cette opinion, il avait cité le fait qu'en remplaçant autour du plateau et des frottoirs de la machine électrique l'air atmosphérique par le gaz acide carbonique, il n'y a plus d'électricité possible. Mais Gay-Lussac remarqua que cette absence d'électricité était due à l'eau hygrométrique dont il est très-difficile de dépouiller le gaz acide carbonique, et il réussit à obtenir de l'électricité avec des amalgames très-oxydables dans une atmosphère d'acide carbonique bien desséchée.

M. Péclet a repris ces expériences en partant du principe que le gaz peut agir de deux manières, quand on développe de l'électricité par le frottement, ou comme intervenant dans la production de cette électricité, ou comme corps plus ou moins conducteur. Après avoir constaté par des expériences délicates faites au moyen de la balance de Coulomb, d'après un procédé analogue à celui que nous avons déjà décrit[1], l'égalité des facultés con-

[1] Tome II, pages 84 et suiv.

ductrices de l'air et de l'acide carbonique bien desséchés, il a disposé un appareil électrique, composé d'un cylindre de verre et de frottoirs enduits d'or musif, de façon qu'il pût être en entier placé sous une cloche munie d'une boîte à cuir traversée par une tige métallique qui pouvait communiquer, au moyen d'un engrenage au cylindre de verre, le mouvement de rotation qu'on lui imprimait extérieurement à l'aide d'une manivelle. En opérant sur de l'air de la cloche préalablement desséché pendant douze heures par du chlorure de calcium, puis sur de l'acide carbonique introduit à la place de l'air dans la cloche, après avoir été complétement desséché, il a trouvé que les indications d'un électroscope intérieur, qui communiquait par un fil de cuivre passé à travers la cloche avec un peigne métallique placé vis-à-vis et très-près du cylindre de verre, étaient exactement les mêmes pour les deux gaz, pourvu qu'ils fussent également secs. Comme on pouvait objecter qu'il restait dans ces expériences une petite quantité d'air mélangée à l'acide carbonique, M. Péclet a opéré successivement sur de l'air, sur de l'hydrogène et sur de l'acide carbonique, en ayant soin, pour ces deux derniers gaz, de ne faire d'expérience qu'après que la cloche avait été vidée et remplie successivement du même gaz six fois, de sorte qu'on pouvait être bien certain de la pureté du gaz. Les résultats ont toujours été les mêmes. Ainsi, il demeure bien prouvé que, dans la production de l'électricité par le frottement, l'action de l'air sur les enduits plus ou moins oxydables des frottoirs n'a aucune influence.

Parmi les substances éminemment électriques, nous devons citer encore le coton-poudre de Schoenbein, qui, dur et filamenteux, est un isolant parfait et négatif avec tous les corps connus. Le collodium, qu'on obtient en une pellicule mince en faisant évaporer une dissolution de coton-poudre dans l'éther sulfurique qu'on a étendue sur une plaque de verre, est aussi électrique au plus haut degré, et négatif, sauf avec le coton-poudre, avec lequel il est positif. Si l'on plonge, suivant le procédé de Pelouze, du papier fin non collé dans un mélange d'acide sulfurique et d'acide nitrique fumant, qu'on le lave ensuite à pleine eau, il prend une apparence jaunâtre et trans-

lucide semblable à du parchemin et acquiert des propriétés fortement électriques; car il suffit, lorsque plusieurs feuilles du papier ainsi préparé sont superposées, de frotter la supérieure avec la main pour qu'elles restent adhérentes les unes aux autres quand on soulève la première, et pour qu'en les séparant elles donnent de vives étincelles. Ce papier est positif avec le coton-poudre et le collodium, et il est négatif avec toutes les autres substances. Sa puissance électrique est si considérable, qu'on peut en tirer de fortes étincelles accompagnées d'un dégagement d'ozone. M. Schoenbein, qui a remarqué, le premier, les propriétés si fortement électriques de ce papier, avait proposé de l'employer à la construction de machines électriques, qui, par conséquent, auraient été sans verre. Au reste, on a remarqué que, dans la fabrication du papier ordinaire, il y a un dégagement continu d'étincelles électriques, quand, pour le faire sécher, on fait glisser le papier encore en pâte le long des cylindres métalliques chauffés intérieurement par la vapeur.

M. Colladon a remarqué également que, dans les filatures de coton, l'opération à laquelle sont soumis les faisceaux de coton, qu'on comprime, qu'on étire et qu'on tord pour en faire des fils, en les faisant glisser sur des surfaces métalliques qui les guident, dégage beaucoup d'électricité. Les fils de coton se chargent d'électricité négative et les métiers prennent la positive. Il en résulte, lorsque l'air est sec, que les métiers d'un côté, et les filaments de coton de l'autre, gardent leur électricité, que les arêtes et les points culminants des métiers attisent les petits filaments de coton qui voltigent dans la chambre, ce qui dérange l'opération du filage, laquelle est aussi entravée par l'état électrique des filaments de coton, qui, en favorisant leur séparation, leur désagrégation, occasionne aussi une rupture plus fréquente des fils. On a encore observé à New-York, dans des maisons construites avec des matériaux très-secs, que le simple frottement du cuir des souliers contre les tapis de laine qui recouvrent les planchers sur lesquels marche une personne dégage assez d'électricité pour que cette personne en soit chargée d'une manière incommode, vu que dès qu'elle ap-

proche sa main et sa figure d'un corps conducteur, il s'en échappe une étincelle souvent fort désagréable.

Nous devrions, avant de poursuivre l'étude de l'électricité dégagée par le frottement, donner ici la série des corps classés d'après la nature de l'électricité qu'ils acquièrent en étant frottés successivement les uns avec les autres; mais cette série est difficile à établir, à cause de la difficulté de tenir compte de toutes les circonstances qui influent sur la nature de l'électricité que prend chaque corps. Voici toutefois un tableau assez exact des principales substances disposées les unes à la suite des autres, dans un ordre tel que chacune est positive avec celle qui suit et négative avec celle qui précède :

Peau de chat, diamant, flanelle, ivoire, cristal de roche, laine, verre, coton, toile de lin, soie blanche, la main sèche, bois, cire à cacheter, colophane, ambre, soufre, caoutchouc, gutta-percha[1], *papier préparé, collodium, coton-poudre.*

L'analyse que nous venons de faire des effets électriques dus au frottement démontre clairement que ces effets sont bien dus exclusivement aux mouvements moléculaires que détermine cette action mécanique; mais il importe d'en préciser un peu mieux la nature et de rechercher les circonstances qui peuvent la rendre plus ou moins efficace. C'est ce qu'a fait M. Péclet dans un remarquable travail où il a étudié successivement l'influence de la vitesse, de la pression, de l'étendue des surfaces de contact, de l'état de la surface des corps, de leur épaisseur et de leur nature. La machine électrique dont se servait M. Péclet était une machine à cylindre de verre, dans laquelle le frottoir se trouve placé sur le point le plus élevé du cylindre; la pression est produite par des poids disposés sur le frottoir; le cylindre est arrondi et poli autour, afin d'éviter les inégalités de frottement; l'électricité est perçue par un peigne métallique qui communique directement, au moyen d'un fil de cuivre recouvert de taffetas ciré, avec un électromètre à pendule dont la disposition permet de suivre exactement les variations de ten-

[1] La gutta-percha est isolante surtout à la surface, car elle conduit assez bien dans l'intérieur de sa masse.

sion qui surviennent quand on modifie les circonstances du frottement. Les premières expériences ont eu pour but de déterminer l'influence de la durée du frottement sur l'intensité de l'électricité développée; il résulte de toutes celles qui ont été faites avec un très-grand nombre de corps employés comme frottoirs, tels que le papier nu, le papier recouvert d'une feuille mince de cuivre, d'étain, d'argent et d'or, l'étain en feuilles et diverses étoffes de laine, de soie, de coton, le taffetas ciré, le cuir, etc., que la déviation de l'électromètre va constamment en croissant pendant un certain temps, après lequel elle reste sensiblement constante, quelle que soit d'ailleurs la vitesse, pourvu que cette vitesse ne change pas. La permanence de la déviation s'établit quelquefois après la première minute ; d'autres fois, elle exige un temps beaucoup plus long, jusqu'à sept minutes. Cet accroissement graduel et plus ou moins rapide tient à plusieurs causes, en particulier à la déformation qu'éprouve la surface du frottoir pendant les premiers instants du frottement.

Après l'influence du temps, celle de la vitesse est importante à connaître. Un très-grand nombre d'expériences faites avec des frottoirs de différentes espèces et dans des circonstances atmosphériques favorables, c'est-à-dire quand l'air est très-sec, ont montré que la vitesse avec laquelle a lieu le frottement est sans influence sur la quantité d'électricité développée, et que le pendule de l'électromètre conserve la même déviation pour des vitesses de rotation du cylindre de verre croissant de 1 à 8, et cela également pour des pressions des frottoirs grandes et petites. Quand l'air est humide, la déviation croît un peu avec la vitesse de 1 à 2° seulement; il est également à remarquer que la permanence ne se maintient pas quand les vitesses sont très-petites; la déviation alors diminue avec la vitesse, et cela d'autant plus que l'air est plus humide ; ce qui provient, comme il est facile de le comprendre, de ce que la déperdition de l'électricité est proportionnellement plus rapide et que l'équilibre entre cette déperdition et la production s'établit à une limite inférieure. Il est en outre quelques substances qui, employées comme frottoirs, produisent des déviations qui aug-

mentent avec la vitesse ; telles sont, par exemple, de la pluche de soie, de la toile de coton, de la toile de fil, etc. Ces anomalies sont évidemment dues à la neutralisation de l'électricité du cylindre de verre par les aspérités du frottoir au delà des points de contact, neutralisation qui doit être d'autant moindre que la vitesse est plus grande. Il suffit, pour s'en assurer, de suivre le mouvement que l'électricité imprime aux filaments de la surface du frottoir, et surtout d'observer dans l'obscurité les points lumineux qui les terminent ; cette influence doit être d'autant plus grande que le corps est meilleur conducteur et que les filaments de sa surface sont plus longs et plus flexibles ; c'est en effet ce qu'on observe quand on se sert comparativement d'étoffes de soie et de coton, ou de toile de même structure. Au reste, on peut à volonté produire ou faire disparaître sur certains corps les anomalies dont il s'agit, en rendant lisse ou plucheuse la partie du frottoir qui dépasse le contact. La conductibilité imparfaite du frottoir, en empêchant l'écoulement immédiat de l'électricité que le frottement développe sur lui, peut exercer une influence en sens contraire de la précédente et diminuer avec la vitesse la tension électrique que doit acquérir le cylindre de verre, dont une partie de l'électricité est reprise dans ce cas par celle de nom contraire que le frottoir conserve trop longtemps. La vitesse non-seulement est sans influence, si on a soin d'éliminer toutes les causes d'erreur, sur le maximum de tension électrique qu'acquiert le cylindre de verre frotté, mais elle n'en a point non plus sur la quantité absolue d'électricité qui est produite. Il est facile de s'en assurer en plaçant une boule métallique communiquant avec le sol, à une distance du conducteur de la machine telle, qu'il se manifeste une étincelle à chaque tour, le mouvement étant uniforme. Si on change de vitesse, l'étincelle part également à chaque tour, quelle que soit cette vitesse. Or, la décharge du conducteur ayant toujours lieu sous la même tension, il est évident que le cylindre fournit toujours la même quantité d'électricité à chaque rotation, et que par conséquent, dans un même temps, la quantité d'électricité produite est proportionnelle à la vitesse, c'est-à-dire au nombre des rotations. Ce ré-

sultat n'est, comme pour le précédent, absolument vrai que pour les frottoirs qui conduisent bien l'électricité, tels que les métaux, le papier, le cuir; pour les corps mauvais conducteurs, les décharges ne se manifestent que pour un nombre de tours qui doit être d'autant plus considérable que la vitesse est plus grande; ce qui est facile à comprendre, d'après ce que nous avons dit plus haut.

En résumé, nous voyons que la vitesse est sans influence sur le développement de l'électricité, et que les anomalies qu'on observe quelquefois proviennent de l'humidité de l'air, des aspérités des surfaces, ou de l'imparfaite conductibilité des corps; et il est probable aussi que, pour des vitesses excessivement grandes, le dégagement de chaleur qui accompagne le frottement serait une cause de perturbation.

Un très-grand nombre d'expériences ont démontré que la pression est aussi sans aucune influence sur la tension de l'électricité développée. Il résulte d'un examen attentif des faits que la loi qui consiste en ce que les déviations de l'électroscope sont indépendantes des pressions brutes exercées sur le frottoir, subsiste encore quand on considère les pressions éprouvées par les pointes réellement en contact; c'est-à-dire que ces pointes éprouvent toujours un accroissement de pression correspondant à celui de la charge, malgré l'augmentation de leur nombre. Quelques anomalies présentées avec certains corps sont dues à la chaleur que développe le frottement; c'est ce dont M. Péclet s'est assuré directement.

La longueur du frottoir, soit l'étendue de la surface frottée, n'influe nullement non plus sur la déviation des boules de l'électroscope; mais il n'en est pas de même de la courbure du frottoir au delà du contact, qui a une influence réelle sur la quantité d'électricité; quantité qui diminue d'une manière très-sensible avec le rayon de courbure. Ce fait, qui ne se présente que quand le frottoir est un corps conducteur, dépend évidemment des phénomènes qui se développent au moment de la séparation des deux surfaces. Il y a toujours dans cet instant une recomposition d'une certaine proportion des électricités contraires que les deux corps avaient acquises par le

contact, et qui deviennent libres lors de la séparation. On peut même le reconnaître en observant dans l'obscurité des traces lumineuses à l'extrémité du coussin. Du reste, on conçoit facilement l'influence de la courbure telle qu'elle se manifeste dans ces expériences, en remarquant que le frottoir doit prendre, sous l'action de l'électricité du cylindre, une tension croissante à mesure que la courbure diminue, et qui doit nécessairement augmenter la quantité des deux principes électriques qui se recomposent.

L'épaisseur, soit du frottoir, soit du verre frotté, a très-peu d'influence sur les résultats, du moins au delà de certaines limites. Il faut seulement avoir égard, en ce qui concerne le verre, à ce que, lorsqu'il est creux comme un tube, au lieu d'être plein comme une tige, l'humidité intérieure exerce une influence qu'on aurait tort d'attribuer à la différence d'épaisseur.

Nous avons vu qu'on distingue deux espèces de frottements, celui de glissement et celui de roulement. Pour comparer les effets des deux modes, M. Péclet s'est servi d'un cylindre de cuivre creux garni à sa surface de plusieurs cuirs destinés à lui permettre de s'appliquer exactement sur le cylindre de verre de la machine électrique dans une certaine étendue. On pouvait, au moyen de poids, faire varier la pression de ce frottoir contre le verre. En rendant le cylindre immobile, on produisait le frottement de glissement ordinaire; en le laissant libre de rouler autour de son axe, on obtenait le frottement de roulement. Dans ce dernier cas, le cylindre roulant tend, à cause des inégalités de la surface, à se séparer du cylindre de verre, et cela d'autant plus que la vitesse de rotation est plus grande. Pour obvier à cet inconvénient, le meilleur moyen est d'employer les mains pour maintenir le cylindre roulant sur le verre. On observe ainsi que l'influence de la vitesse et de la pression, dans ce mode de frottement, est nulle comme dans l'autre. Quant à la comparaison des effets produits par les deux modes de frottement, l'expérience démontre que le papier, la peau et les métaux, ou leurs alliages, produisent la même quantité d'électricité par le frottement de glissement et par celui

de roulement. Les différences qu'on observe avec d'autres corps tiennent à des circonstances accessoires telles que les filaments qui, agissant différemment dans un cas et dans l'autre, peuvent soutirer l'électricité. Il faut aussi avoir égard à une différence importante entre les deux modes de frottement; c'est que dans le roulement, il y a adhésion ou pression continues, et que dans la friction par glissement il n'y en a pas.

Enfin il résulte de quelques observations de M. Péclet, que la chaleur, ainsi que les aspérités de la surface des corps, produisent une tendance négative, et que la chaleur dégagée par le frottement lui-même tend toujours à donner une tension plus négative ou moins positive à celui des deux corps qui est le moins bon conducteur du calorique; résultats tous conformes à ceux qu'avait déjà obtenus Coulomb, et que nous avons rapportés plus haut.

Nous terminerons ce paragraphe en complétant, au moyen des données que nous a fournies l'étude que nous venons de faire, la description et la théorie des machines électriques fondées sur le dégagement de l'électricité par le frottement, que nous n'avons fait qu'esquisser au commencement de ce traité[1].

Nous avons déjà remarqué que toute espèce de verre n'est pas également propre à former le disque d'une machine. Les verres tendres et les verres durs, lorsqu'ils sont récemment préparés et que le frottement a rendu leur surface rayée, ont une faculté conductrice qui diminue notablement leur pouvoir électrique. Le verre le plus convenable n'est pas celui qui est le plus transparent, mais celui qui présente sur sa surface de petits points brillants (d'acide silicique). Les oxydes métalliques qui se trouvent mélangés au verre, et qui lui donnent une teinte bleue, verte ou noire, n'ont en général aucune influence fâcheuse, sauf dans le cas où l'oxyde est celui de manganèse, qui donne une couleur violette au verre. Toutefois, il est très-rare que ce soit la masse même du verre qui soit conductrice; la conductibilité est plutôt superficielle, et a sa source dans la nature hygroscopique de la surface.

[1] Tome I, pages 17 et suiv.

A circonstances égales, un disque de verre a une vertu électrique d'autant plus grande, qu'il est plus mince; ce qui tient à ce que les deux surfaces du disque étant électrisées de la même électricité, les deux couches électriques, en vertu de leur répulsion mutuelle, ont d'autant plus de densité qu'elles sont plus rapprochées, et que, par conséquent, l'épaisseur du disque est moindre. M. Riess cite une machine électrique excellente dont le disque de verre a à peine 3 millimètres d'épaisseur. Il ne serait pas prudent, à cause de sa fragilité, d'aller au-dessous de cette limite.

Le disque de verre passe, après avoir été frotté, entre les pointes de deux mâchoires métalliques faisant partie du conducteur isolé, et qui embrassent le bord du disque aux extrémités de son diamètre horizontal ou vertical. La convenance d'agir ainsi pour soutirer l'électricité sur les deux faces du verre n'est pas parfaitement établie, car si on semble gagner d'une manière directe une plus grande absorption d'électricité, d'un autre côté on aurait, en n'agissant que sur une des faces, une électricité douée d'une plus grande densité sur cette face, par l'influence répulsive de l'électricité de l'autre. Cependant, sauf dans quelques cas particuliers, il est préférable de soutirer à la fois l'électricité des deux faces. Il est important de pouvoir varier la distance entre le disque de verre et la portion du conducteur qui soutire l'électricité, parce que cette distance doit différer soit avec la nature du verre, soit avec le plus ou moins de densité dont on veut que soit douée l'électricité qui s'accumule sur le conducteur. On peut employer, pour obtenir ces variations de distances, le système imaginé par Oertling (fig. 292).

Fig. 292.

Les coussins doivent avoir avec le sol une communication parfaite, si l'on veut obtenir sur le disque une forte électricité. Quant à leur largeur, si d'une part elle augmente l'étendue de la surface frottée, d'un autre côté elle a l'inconvénient, quand elle dépasse certaines limites, de faire perdre au disque une

partie de l'électricité qu'il avait acquise en augmentant sa surface de contact avec un corps conducteur. Il y a donc un juste milieu à tenir, qui dépend de la nature du verre; il ne faut pas, en général, que la longueur du coussin dépasse 5 centimètres. On doit avoir soin d'éviter, dans la construction des frottoirs, toutes les pointes ou arêtes vives qui auraient l'inconvénient de soutirer, et, par conséquent, de diminuer l'électricité du disque. C'est vers le bord du coussinet, là où le disque de verre l'abandonne après avoir été frotté, qu'on risque le plus de rencontrer une communication qui ferait perdre une partie de l'électricité. C'est pourquoi l'on place à cet endroit des prolongements de taffetas bien isolant qui recouvrent le disque jusque près des conducteurs, pour protéger son électricité contre la déperdition provenant de l'action de l'air. Comme nous l'avons dit, on recouvre la peau des coussins d'or musif ou d'un amalgame formé d'étain et de zinc fondus ensemble en

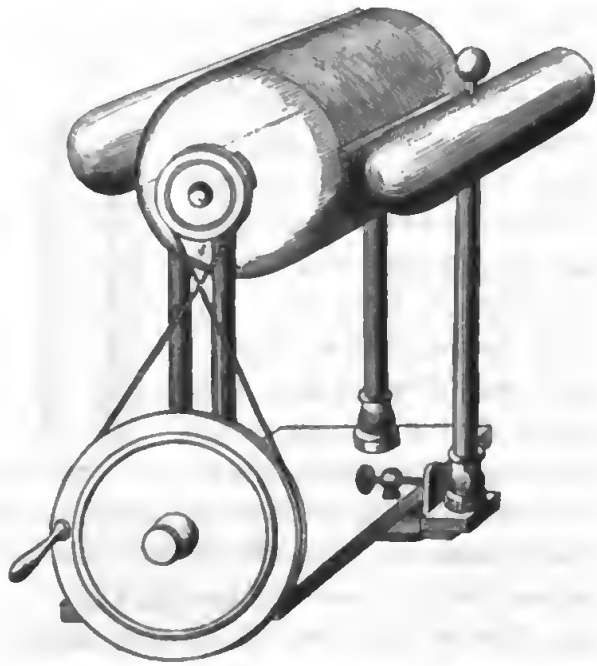


Fig. 293.

proportion égale, avec une addition de deux parties de mercure. Le tout, après avoir été agité dans un flacon, est broyé dans

un mortier en une poudre fine. Avant d'étendre l'amalgame sur les coussins, on les frotte légèrement avec quelques petits morceaux de beurre de cacao. Un coussinet bien amalgamé conserve longtemps son activité électrique, pourvu qu'on ait soin d'en enlever fréquemment la poussière que le plateau de verre y accumule. Il faut avoir soin, avant de mettre une seconde couche d'amalgame sur les coussins, d'enlever entièrement l'ancienne. Il faut aussi nettoyer de temps à autre le plateau de verre lorsqu'il a été sali par l'amalgame, et on se sert pour cela d'éther sulfurique.

Telles sont les principales précautions qu'il faut prendre pour avoir de bonnes machines électriques. Nous terminerons ce paragraphe en en représentant deux, l'une à plateau (fig. 293),

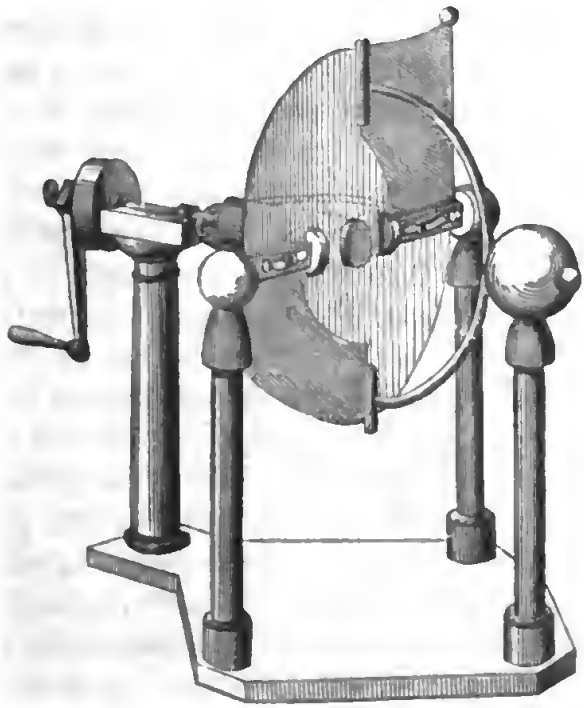


Fig. 294.

l'autre à cylindre (fig. 294), construites avec tout le soin imaginable. Quoique, ainsi que nous l'avons vu, la rapidité du frottement n'influe nullement sur la quantité d'électricité produite, cependant il ne faut pas tourner le verre trop lentement,

afin de ne pas donner à l'électricité le temps de se perdre, entre le moment où elle a été produite par le frottement opéré par les coussins et celui où elle se décharge contre les conducteurs. La vitesse de rotation est surtout nécessaire avec la machine à cylindre où il n'y a qu'un frottoir, et où par conséquent il s'écoule un intervalle de temps assez long entre le moment du développement de l'électricité par le frottement du verre et celui où elle est soutirée par le conducteur isolé.

§ 2. Dégagement de l'électricité dans le frottement des corps en poudre, des liquides et des gaz. — Machine hydro-électrique.

Lorsqu'un corps en poussière est chassé par un soufflet, le frottement qu'il exerce contre le bout même du soufflet, contre une plaque inclinée qu'il rencontre ou contre un tamis ou une étoffe qu'il traverse, suffit pour développer de l'électricité. Bennet a fait la remarque curieuse que la craie en poudre, lancée par un soufflet contre le plateau de l'électroscope, donne de l'électricité positive si le plateau est à 12 centimètres du soufflet, et de la négative s'il est à 15. Cela tient à ce que la craie éprouve deux frottements : l'un contre le tube du soufflet qui la rend positive, et l'autre contre le plateau de l'électroscope qui rend ce dernier négatif. Suivant la distance, c'est l'une ou l'autre des deux électricités qui l'emporte. De la glace en poudre et de la neige bien sèche lancées par un soufflet donnent de fortes lignes d'électricité. Quand on fait glisser de la limaille métallique contre une plaque unie de métal, on obtient des lignes électriques à cause de la faible conductibilité de la limaille. M. Becquerel, qui a fait une étude toute particulière de ce mode de dégagement de l'électricité, a observé que lorsqu'on projette la limaille d'un métal sur une lame du même métal, celle-ci prend l'électricité positive, et la limaille la négative : l'effet est d'autant plus marqué que la limaille est plus fine et le choc plus rapide. Si la lame et la limaille ne sont pas du même métal, l'effet de la division du métal se complique de celui qui tient au développement de l'électricité voltaïque, qui

a lieu au contact des deux métaux hétérogènes. Ainsi la limaille de cuivre est négative avec des lames de zinc, de plomb, d'étain, de fer, de bismuth et d'antimoine; le zinc en limaille est, par contre, positif avec des lames de platine, d'or, d'argent, de cuivre et d'étain; il est négatif avec des lames de zinc, de bismuth, d'antimoine et de fer. Les oxydes métalliques, ainsi que leurs sulfures réduits en poudre, sont négatifs par rapport à leurs métaux. Il faut éviter que les poussières soient trop fines, car elles s'attachent aux surfaces et empêchent le frottement des parties qui viennent ensuite.

Ces effets sont évidemment liés avec la force d'agrégation, et par conséquent avec la constitution moléculaire des corps; aussi présentent-ils beaucoup d'anomalies tenant précisément à celles qu'offre cette constitution même. Ainsi nous voyons que l'antimoine, qui doit probablement à son mode de cristallisation le caractère spécial qu'il joue dans les phénomènes de cet ordre, est négatif quand il est en lame par rapport à sa limaille, tandis que c'est l'inverse pour les autres métaux. La chaleur, en général, augmente l'intensité des effets, agissant comme le fait ordinairement la division des parties; dans quelques cas, tels, par exemple, que celui où la limaille est de zinc, et où les lames sont peu oxydables, savoir, de platine, d'or, d'argent ou de cuivre, l'élévation de la température produit une inversion dans la nature des signes électriques, le zinc étant négatif au lieu d'être positif.

Indépendamment des expériences que nous venons de rapporter, il en est encore un très-grand nombre soit plus anciennes, soit plus récentes, sur les effets électriques produits par les corps en poudre. Ainsi on a étudié l'électricité prise par différentes espèces de poudres transmises à travers des cribles faits avec des tissus de diverses substances organiques; on a remarqué qu'en général les acides solides ainsi que les terres réduites en poudre prennent ainsi criblés l'électricité négative. On a également étudié l'électricité développée par le frottement des poudres les unes contre les autres. Ainsi on s'est assuré que la cire à cacheter en poudre, frottée avec du soufre en poudre, est positive, et que la poussière de soufre

est négative, tandis que les deux poudres également sont négatives, quand elles sont frottées chacune séparément avec de la toile. C'est au moyen des figures de Lichtenberg qu'on constate facilement la nature de l'électricité de chaque poudre. Nous exposerons plus loin quelques expériences de Faraday sur l'électricité développée par le frottement des corps en poudre, au moyen d'un appareil semblable à celui qui lui a servi à l'étude de l'électricité dégagée par le frottement des liquides et des fluides élastiques. Il nous faut auparavant nous occuper de ce dernier point.

Pendant longtemps les essais qu'on avait faits pour obtenir des signes électriques par le frottement des liquides avaient été infructueux, sauf dans le cas où le liquide était du mercure. Volta avait inutilement employé de l'huile, et il avait considéré l'état liquide comme défavorable à la manifestation de ces phénomènes. Cependant, en faisant usage de liquides amenés à l'état de globules très-divisés, soit isolés, soit mélangés avec un courant d'air, on obtint par leur frottement contre des corps solides, des effets électriques très-prononcés; ainsi l'éther, l'alcool et des résines liquides projetées contre du verre dépoli, le rendent très-positif. On a également remarqué un dégagement de lumière dans la sortie soudaine de l'air très-comprimé du vase où il est renfermé; plusieurs expériences faites en déchargeant des fusils à vent ont donné un résultat semblable. Mais on n'a jamais obtenu la preuve directe que cette lumière eût une origine électrique. Toutefois Wilson avait réussi à électriser de la tourmaline, du verre et de l'ambre, en dirigeant contre ces substances un courant d'air sorti d'un soufflet de forge. Henley et Lichtemberg avaient électrisé de l'ambre et de la cire à cacheter au moyen de l'air chassé par un soufflet ordinaire; mais le dernier de ces deux physiciens n'avait obtenu aucun effet avec les métaux. Volta n'en avait également obtenu aucun en faisant tourner rapidement dans l'air des métaux, tandis qu'il en avait aperçu quelque faible effet en opérant de même avec des corps isolants. Marx, de son côté, n'avait pu électriser pas plus le verre que les métaux par leur frottement contre l'air. Plus tard Faraday a

parfaitement expliqué ces résultats contradictoires en montrant que des corps solides tels que le bois, le soufre et les métaux ne peuvent être électrisés par leur frottement contre de l'air bien sec, mais ne le sont qu'autant que l'air renferme de l'eau ou quelque autre liquide.

Nous avons dit que de tous les liquides, celui dont le frottement contre les solides donne les signes les plus prononcés d'électricité est le mercure. Dessaignes, qui a fait un grand nombre d'expériences sur ce sujet, avait trouvé une grande différence entre les diverses substances quant à leur faculté de s'électriser par une simple immersion dans le mercure. Ainsi l'ambre, le soufre, la cire d'Espagne et le verre ne deviennent point électriques par cette simple immersion; il faut pour qu'ils le deviennent qu'ils soient un peu plus chauds que le mercure, et que l'immersion soit brusque de manière à produire un choc, tandis qu'avec le papier, le coton dont les particules éprouvent très-facilement un dérangement de position, il suffit d'un léger ébranlement tel que celui qui résulte de l'immersion lente, pour qu'il y ait dégagement d'électricité. Du reste, les résultats obtenus par Dessaignes sont tellement complexes que nous ne nous y arrêtons pas davantage, à cause de la difficulté de bien distinguer les diverses causes qui concourent à leur production.

M. Perego a repris l'étude des faits observés par Dessaignes, en observant avec raison que ce dernier physicien avait eu tort de ne s'occuper que de l'électricité acquise par le corps plongé dans le mercure, et nullement de celle que prend ce métal. Pour obtenir cette dernière, il verse un peu de mercure dans un verre à pied et le fait communiquer au moyen d'un électroscope avec un fil de fer; puis il plonge dans le mercure, par une de ses extrémités, la substance qu'il veut éprouver, en la tenant entre ses doigts par son autre extrémité. Tant que la substance reste plongée dans le mercure il n' y a point de signe électrique, mais on en aperçoit au moment où l'on commence à la retirer; ils deviennent plus intenses à mesure que la partie retirée devient plus considérable; ils sont à leur maximum à l'instant où le corps cesse d'être en contact avec

le mercure. L'électricité qu'acquiert le mercure est positive quand la substance immergée est d'une nature organique, telle que le papier, la toile, la laine, le drap, la soie, le taffetas, les plumes à écrire et le feutre; elle est très-forte surtout avec ces quatre dernières substances. Le mercure est en général négatif quand les substances immergées sont minérales, telles que le cristal de roche, le soufre, le verre, etc.; cependant il y a des exceptions. Ajoutons que l'ambre et la cire d'Espagne rendent le mercure très-fortement positif. La température modifie dans quelques corps seulement, et non dans tous, la nature de l'électricité dont se charge le mercure. Il faut avoir soin dans ces expériences de bien décharger le mercure entre deux expériences successives, car il risquerait sans cela de conserver de l'électricité, probablement à cause du verre qui, recouvert extérieurement d'une légère couche d'humidité, constitue une véritable bouteille de Leyde, dont le mercure est l'armure intérieure et la couche humide l'armure extérieure.

Le feutre donne dans ces expériences une telle quantité d'électricité au mercure qu'on peut en tirer des étincelles; il en est de même des plumes; il suffit d'en prendre entre les doigts six ou sept, et de plonger leurs extrémités barbelées dans le mercure jusqu'au fond du vase, pour qu'en les retirant le mercure donne une étincelle. On obtient également un dégagement considérable d'électricité en projetant contre les parois du verre, dont le fond contient toujours du mercure en communication avec un électroscope au moyen d'un fil de fer, un jet de mercure provenant d'une masse de mercure contenue dans un autre verre à pied. L'expérience réussit mieux quand on a soin de chauffer préalablement le verre afin de chasser toute l'humidité. Au reste, on peut constater le fort dégagement d'électricité qui résulte du frottement du mercure contre le verre, en observant la lueur qui se manifeste dans le haut d'un baromètre dont on fait mouvoir légèrement la colonne de mercure, ou dans un tube de verre fermé et vide d'air qui renferme un peu de mercure, qu'on agite en lui faisant parcourir vivement l'intérieur du tube de l'une de ses extrémités à l'autre.

Venons-en maintenant au dégagement considérable d'électricité que peut produire le frottement de l'eau contre les corps solides, dégagement qui sert de base à la machine hydro-électrique. La production de l'électricité par cette machine a été découverte avant qu'on en connût la cause, et même on l'a attribuée à une cause toute différente de la véritable. C'est M. Armstrong qui l'observa le premier dans l'usine de Sighill, près de Newcastle. Un mécanicien ayant un jour mis accidentellement l'une de ses mains dans le jet de vapeur d'une chaudière à haute pression, tandis que l'autre était occupée à ajuster un poids au levier de la soupape, fut fort surpris de voir passer entre le levier et sa main une étincelle brillante, et de sentir en même temps dans ses bras une violente secousse. Il obtint le même effet en touchant une partie quelconque de la chaudière, ou toute pièce métallique en communication avec elle. M. Armstrong analysa avec soin tous ces effets; il constata dans cette expansion subite de la vapeur, la production d'une forte électricité positive dont la vapeur était chargée; il ne trouva pas d'abord d'électricité négative dans le corps même de la chaudière, ce qui tenait à ce qu'elle n'était pas isolée; car plus tard en l'isolant, il en obtint des signes prononcés. Plusieurs autres physiciens répétèrent et varièrent les expériences d'Armstrong; mais partant, comme lui, du principe que le dégagement de l'électricité était dû à l'expansion de la vapeur, principe erroné, comme nous allons le voir, ils n'ajoutèrent rien de bien important aux recherches du premier observateur. M. Peltier seulement en prit occasion pour faire des expériences curieuses que nous décrirons plus tard, sur l'électricité qui accompagne la vaporisation de l'eau saturée de différents sels, croyant voir là, d'après quelques résultats décrits par Armstrong, la cause de l'électricité dégagée avec les chaudières.

C'est à M. Faraday qu'on doit d'avoir découvert et bien établi la nature de cette cause, à la suite d'une analyse expérimentale, remarquable comme toutes celles qu'a produites l'illustre physicien. Son appareil consistait dans une simple chaudière cylindrique isolée sur trois blocs de laque et munie

d'un tuyau de 1dec., 52 de longueur (fig. 295) qui portait à son extrémité un grand robinet et une sphère de métal creuse

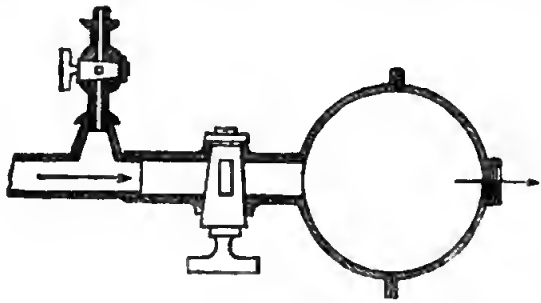


Fig. 295.

de 63 centimètres cubes de capacité. Cette sphère, appelée *globe de vapeur*, était percée d'une autre ouverture à laquelle on adaptait les appareils de formes diverses devant servir à l'issue de la vapeur; ces pièces étaient assez petites par rapport au globe et au tuyau qui le faisait communiquer avec la chaudière, pour qu'on pût considérer le globe et le tuyau comme faisant partie de la chaudière, et pour que les pièces elles-mêmes offrissent à l'issue de la vapeur un obstacle suffisant pour occasionner un frottement considérable. Une des pièces se composait (fig. 296) d'un tube métallique évasé en entonnoir, et d'un cône qu'une vis faisait avancer plus ou moins dans l'entonnoir, de sorte que la vapeur en sortant frottait contre le cône; on pouvait du reste isoler ce cône, ou le mettre en communication électrique avec l'entonnoir et la chaudière. Une autre pièce (fig. 297) consistait en un tube muni d'un robinet et d'un canal alimentaire fixé au-dessus de ce tube, ce qui permettait d'introduire tout autre liquide dans le courant de vapeur, de manière qu'il fût entraîné avec lui. Enfin une dernière pièce (fig. 298) renfermait une petite chambre cylindrique C destinée à re-

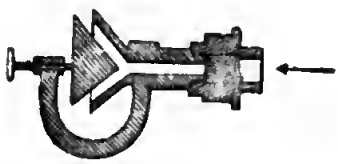


Fig. 296.

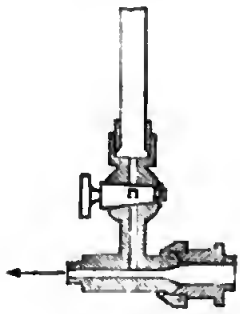


Fig. 297.

cevoir différents liquides, de façon que la vapeur en sortant du globe à vapeur, se mêlait en entrant dans cette chambre plus ou moins avec le liquide qui s'y trouvait, et venait ensuite frotter contre le cône ou toute autre pièce qu'on pouvait y adapter. Les expériences ont toutes été faites avec de la vapeur dont la force élastique a varié entre $\frac{1}{4}$ et $\frac{3}{4}$ d'atmosphère, sans jamais dépasser cette dernière pression. L'électricité de la chaudière était perçue soit au moyen d'un électroscope à feuilles d'or, soit au moyen d'un électromètre à décharge. Pour observer l'électricité de la vapeur, il fallait faire passer celle-ci à travers un tube isolé garni intérieurement de diaphragmes de toile métallique, ou en plaçant sur le trajet de la vapeur des fils ou des plaques d'une substance conductrice. En général, c'est l'électricité acquise par la chaudière que M. Faraday a toujours perçue.

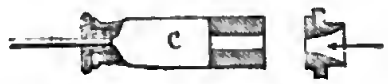


Fig. 298.

Il est d'abord facile de constater que l'électricité produite n'est due ni à la vaporisation ni à la condensation. On n'a, pour cela, qu'à enlever subitement la soupape lorsque la vapeur se trouve sous la plus forte tension, et il ne se produit pas du tout d'électricité, quoique la vaporisation soit considérable. On peut également démontrer que l'issue de la *vapeur seule* ne suffit pas pour développer de l'électricité, mais qu'il faut la présence de l'eau à l'état liquide. Ainsi, tant que le globe à vapeur est vide d'eau et peut recueillir celle qui résulte de la condensation de la vapeur qui y arrive dans les premiers moments de l'opération, la vapeur, en s'échappant, ne produit pas d'électricité; mais dès que le globe est assez rempli pour que le reste de l'eau qui se condense soit entraînée par la vapeur, il se dégage beaucoup d'électricité. L'électricité est donc entièrement due au frottement des particules d'eau que la vapeur entraîne, contre les parois solides des conduits ou contre les obstacles, comme le cône (fig. 296), qui lui sont opposés à dessein. Seulement il est nécessaire qu'elle soit pure; il suffit qu'elle renferme en dissolution une proportion d'un sel ou d'un acide qui la rende meilleure conductrice pour que tout

effet électrique disparaisse. Ce résultat tient évidemment à ce que, lorsque l'eau devient meilleure conductrice, les deux électricités, dégagées lors de son frottement contre les corps solides, dont l'une reste dans ces corps, et l'autre passe dans l'eau elle-même, se recombinent immédiatement. Il suffit, pour constater ce fait important, de mettre dans le globe à vapeur un petit cristal d'un sel tel que le sulfate de soude ou une petite goutte d'acide sulfurique, qui se mêlent à l'eau que la vapeur entraîne : il n'y a plus de dégagement d'électricité; et dès qu'après avoir enlevé ces substances on remet de l'eau distillée dans le globe à vapeur, le dégagement recommence.

Pour déterminer l'influence de la substance contre laquelle vient frotter l'eau, il faut faire usage de cônes (fig. 296) de diverses espèces, qu'on peut isoler à volonté. On a fait successivement usage de cônes en cuivre, en buis, en hêtre, en ivoire, en soufre, en caoutchouc, en cuir verni, etc.; tous sont devenus négatifs pendant que le jet de la vapeur prenait l'électricité positive. Un très-grand nombre d'autres substances prises à l'état de fils, ou de simples fragments, furent tenus dans le jet de vapeur au moyen d'un isolateur, et mis en même temps en communication avec un électroscope à feuilles d'or; toutes furent négatives à des degrés différents, degrés tenant, en grande partie probablement, à leur pouvoir conducteur, qui facilitait plus ou moins la recomposition immédiate des deux électricités.

Il est des substances, telles que l'ivoire, qui développent très-peu d'électricité par le frottement de l'eau; aussi, quand on fait passer la vapeur par un tube d'ivoire, la chaudière se charge à peine d'électricité, et le courant de vapeur n'est pas non plus sensiblement électrique. Cela prouve, encore mieux que tout le reste, que ce n'est pas la vaporisation qui produit l'électricité. Du reste, ce jet neutre sert à étudier l'effet des substances en fils ou en fragments qu'on y place, et c'est avec un semblable jet qu'on a opéré plus haut.

L'eau prend donc toujours l'électricité positive dans son frottement contre les corps solides. Il était intéressant de rechercher quel effet produiraient d'autres substances que l'eau,

en faisant transporter leurs particules par un courant de vapeur. En se servant de l'appareil (fig. 297), et en remplissant la chambre qui surmonte le robinet d'essence de térébenthine, de manière à pouvoir en introduire à volonté dans le passage de la vapeur, on trouve, en laissant pénétrer de cette essence, que l'électricité de la chaudière, qui était négative quand la vapeur d'eau passait seule, devient immédiatement positive dès que le jet de vapeur peut entraîner des particules d'essence de térébenthine; et le jet lui-même devient négatif de positif qu'il était. En fermant le robinet qui donnait issue à l'essence, au bout de peu d'instants les choses reviennent à l'état normal, parce que la vapeur a bientôt chassé les particules d'essence qui étaient restées et qui ne se renouvellent plus. Les différentes espèces d'huiles et les résines dissoutes donnent les mêmes résultats. Quelques liquides, tels que le naphte en particulier, donnent des résultats variables qui tiennent probablement à ce qu'ils peuvent adhérer au corps frotté et changer ainsi sa nature, tandis qu'il faut qu'ils soient emportés par le courant de vapeur.

Il est assez remarquable que, même en très-petite quantité, l'huile, l'essence de térébenthine et la résine dissoute peuvent changer le pouvoir excitateur de l'eau, ce qui tient à ce que les globules d'eau se recouvrent probablement, par l'effet de l'agitation de la masse, d'une couche superficielle de ces substances, de la même manière qu'une goutte d'huile mise sur l'eau s'étale immédiatement sur toute la surface en y formant une pellicule. Mais cette facilité des globules d'eau à se recouvrir ainsi d'une pellicule huileuse dépend de leur pureté; aussi la pellicule d'huile ne peut pas rester longtemps sur la surface d'une eau alcaline qui la dissout, tandis que la pellicule d'essence de térébenthine y persiste.

Après cette étude de l'influence de la vapeur, qui lui avait démontré qu'elle n'exerce aucun effet par elle-même, mais seulement parce qu'elle est un agent mécanique qui entraîne les particules par lesquelles le frottement est exercé, Faraday entreprit quelques expériences sur l'air comprimé, en se servant d'un fort vase en cuivre de 912 centimètres cubes de capa-

cité, muni de deux robinets : l'un servant à l'entrée de l'air, l'autre à sa sortie. Quand l'air n'avait pas été desséché et qu'on le laissait échapper subitement contre le cône de cuivre ou de bois, il rendait ce cône négatif, effet dû évidemment aux particules d'eau condensées par le froid provenant de la dilatation de l'air : ces particules, du reste, étaient visibles dans le brouillard qui apparaissait et dans l'humidité qui recouvrait la surface du bois et du métal. Mais avec de l'air parfaitement sec on n'obtenait aucun effet, preuve que ni l'air *seul*, ni la vapeur *seule*, ne sont capables d'électriser les corps par le frottement.

En adaptant au réservoir où l'air est condensé l'appareil de la figure 298, on peut, en mettant dans la boîte C ces différentes substances, constater l'effet qu'elles produisent en étant entraînées par le courant d'air; c'est ainsi que la poudre de soufre rend négatif le cône de métal, celui de bois et celui de soufre, que la résine en poudre rend négatif le cône de métal, mais positif celui de bois, que l'amidon rend le bois négatif, que la silice en poudre très-fine rend le métal et le bois fortement positifs. Il est assez curieux que le soufre et la silice en poudre prennent des états électriques contraires à ceux que ces deux substances affectent quand elles sont en masse, du moins quand le frottement a lieu au moyen de la forte impulsion que leur imprime le courant d'air qui les entraîne. Toutefois il y aurait même bien des expériences à faire sur ce sujet, quoiqu'il résulte évidemment de l'exposition que nous venons de faire qu'il n'y a d'électricité développée par le frottement qu'autant que les corps frottés sont tous deux solides, ou l'un solide et l'autre liquide, et que le frottement des particules gazeuses contre les solides ne dégage point d'électricité.

Ajoutons, avant de terminer ce paragraphe, que la découverte d'Armstrong a donné naissance à la construction d'une machine électrique très-puissante qui a été nommée *hydro-électrique*, et dont il nous reste à donner la description sommaire.

Cette machine se compose 1° d'une chaudière à vapeur *a*, isolée (fig. 299) ; d'une boîte réfrigérente *b*, de trois becs d'échappement *c* et d'un conducteur *d*.

La chaudière a environ 8 décimètres de longueur et 4 de diamètre; elle est à foyer intérieur; *f* est la porte du foyer; *g*

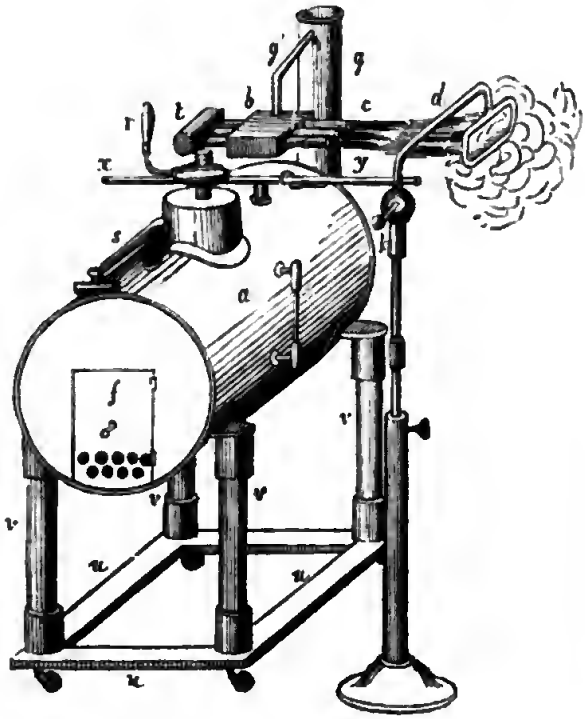


Fig. 299.

la cheminée; on a coutume de la chauffer au charbon de bois; elle est isolée sur les quatre colonnes de verre *v*, qui sont elles-mêmes portées sur un cadre à roulettes *u*; *s* soupape de sûreté; *r* robinet pour donner issue à la vapeur et mettre l'appareil en expérience; lorsqu'on l'ouvre, la vapeur passe d'abord dans le tube *t*, et de là se distribue dans trois petits tubes qui traversent en ligne droite la boîte réfrigérente, et arrive au bec d'échappement qui termine chacun de ces tubes.

La boîte réfrigérente *b* contient de l'eau à la température ordinaire; mais son niveau n'est pas tout à fait assez élevé pour qu'il touche aux tubes à vapeur; seulement des mèches de coton, posées sur ces tubes et plongeant par leurs deux extrémités dans l'eau de la boîte, se mouillent par capillarité, et refroidissent ainsi à un certain degré et les tubes et la vapeur à laquelle ils donnent passage. Les vapeurs qui se produi-

sent dans la boîte se rendent dans la cheminée par le tube *g*.

Le bec d'échappement est la pièce essentielle, c'est de sa construction que dépend la puissance électrique de la machine ; après divers essais, M. Armstrong s'est arrêté à la disposition qui est représentée dans la figure 300. Près de son extrémité, le tube à vapeur s'élargit en cône, et dans ce cône on introduit une pièce qui se compose d'un tronc de cône de bois de perdrix *p*, dont la petite base fait corps avec la pièce de métal *m*. La vapeur arrivant directement contre le métal, se brise ; elle est forcée de gagner la fente, et là, se brise de nouveau pour passer dans l'orifice de grandeur convenable qui est dans l'axe du tronc du cône de bois de perdrix ; l'anneau à vis *n* ne sert qu'à tenir solidement le bec d'échappement.

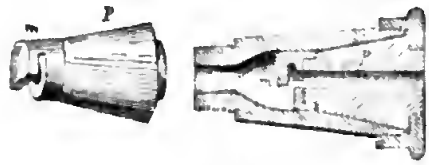


Fig. 300.

En traversant la boîte *b*, le refroidissement a produit quelques fines gouttelettes d'eau qui sont emportées par la vapeur, et c'est le frottement de ces gouttes contre le bois de perdrix qui développe l'électricité, comme nous l'a démontré l'analyse que M. Faraday a faite de ces phénomènes. Ainsi les gouttes d'eau composent le corps frottant, les parois du bec le corps frotté, et la vapeur n'est que l'agent ou le moteur qui détermine une friction rapide.

Le conducteur *d* a la forme qui est représentée sur la figure ; il prend l'électricité à la vapeur ; il est lui-même isolé, et c'est sur la boule *k* que l'on va tirer l'étincelle.

On voit encore un autre tube d'échappement *xy*, qui est destiné à introduire diverses substances pulvérulentes sur le chemin de la vapeur, afin d'étudier leur influence sur la nature et sur la quantité d'électricité produite, comme l'a fait Faraday.

Ce qui distingue surtout les machines hydro-électriques des machines ordinaires, c'est la grande quantité d'électricité à haute tension qu'elles produisent. Une petite chaudière contenant seulement 36 litres d'eau peut donner 4 à 5 étincelles par seconde de 12 à 15 centimètres de longueur. Les grandes chaudières donnent des résultats quatre à cinq fois plus forts.

A certains égards, ces machines semblent réunir les avantages des machines ordinaires à forte tension et ceux des appareils voltaïques dont les effets dépendent principalement de la quantité d'électricité développée à chaque instant.

A côté de ces avantages, les machines hydro-électriques ont l'inconvénient de ne pouvoir servir aux usages journaliers, parce qu'elles exigent, pour donner des effets sûrs et énergiques, des préparations et des soins particuliers. Il est vrai que les circonstances atmosphériques ne les influencent pas au même degré que les machines ordinaires ; au contraire la chaleur qui émane du foyer et de la chaudière rend les soutiens de verre très-isolants et empêche même, quand on se sert pour le chauffage d'un charbon dépourvu d'humidité, la fuite de l'électricité par le courant d'air chaud provenant de la combustion. Mais, d'un autre côté, on est obligé, afin de porter la vapeur à la pression requise de 5 à 6 atmosphères, d'entretenir le chauffage pendant plusieurs heures ; il est nécessaire d'enlever toutes les impuretés de l'intérieur de l'appareil, en y faisant préalablement chauffer une solution de potasse qu'on laisse échapper à travers les tubes, puis en lavant avec de l'eau de pluie très-propre. En outre, il est bon de renouveler, à l'aide d'un coup de lime, l'état intérieur des tubes de bois dont la texture superficielle se ramollit et se détériore par la vapeur chaude. Enfin, pour obtenir de puissants effets, on a trouvé de l'avantage à maintenir la chaudière plusieurs jours en activité, en la chargeant et la préparant chaque jour de nouveau.

§ 3. Dégagement de l'électricité dans le frottement de deux corps bons conducteurs.

Le frottement de deux corps bons conducteurs ne peut pas donner lieu à un dégagement d'électricité à l'état de tension. L'un des corps aurait beau prendre dans le frottement l'électricité positive et l'autre la négative, qu'aucun signe de l'une ou de l'autre de ces deux électricités ne serait perceptible. En effet, jamais on ne peut séparer assez promptement les deux corps frottés l'un de l'autre pour que la recomposition

immédiate des deux principes électriques accumulés séparément sur chacun d'eux, n'ait lieu auparavant. Pour mettre en évidence le développement d'électricité qui accompagne le frottement de deux bons conducteurs tels que deux métaux, il faut employer le moyen imaginé par M. Becquerel. On soude à chacun des bouts d'un multiplicateur à fil court une plaque d'un métal différent; on passe chaque bout dans un bouchon de liége évidé de manière à enchâsser dedans la soudure et une partie de la plaque; on mastique celle-ci au bouchon au moyen duquel on la tient, afin de ne pas l'échauffer par le contact de la main, et qu'en passant simplement l'une des plaques sur l'autre, il n'y ait aucun effet produit à cause de l'égalité de température. Mais dès qu'on les fait glisser légèrement avec frottement l'une sur l'autre, chacune d'elles prend une électricité contraire dont la recomposition, pouvant se faire en partie par l'intermédiaire du fil du multiplicateur, donne naissance à un courant électrique. Voici un tableau de différents corps classés dans un ordre tel que chacun d'eux est négatif par rapport à ceux qui le suivent, et positif par rapport à ceux qui le précèdent [1]. *Bismuth*, *palladium*, *platine*, *plomb*, *étain*, *nickel*, *cobalt*, *cuivre*, *or*, *argent*, *iridium*, *zinc*, *fer*, *cadmium*, *arsenic*, *antimoine*, *anthracite*, *peroxyde de manganèse*. On est immédiatement frappé, en jetant les yeux sur ce tableau, que l'ordre des métaux est exactement le même que celui de leur pouvoir thermo-électrique, et cependant il est facile de s'assurer que l'élévation de la température qui peut résulter du frottement n'est point la cause de l'électricité dégagée. En effet, si l'on se sert de deux cylindres d'un décimètre de longueur, l'un de fer, l'autre de cuivre, et qu'on les frotte de façon que les mêmes points du premier parcourent continuellement toute la surface du second, ces points s'échauffent davantage que la dernière surface, et cependant on obtient le même courant électrique quant au sens ou à l'intensité que dans le cas inverse où l'on

[1] Cette manière de classer les métaux indique que le courant produit par deux métaux tels que bismuth et antimoine, frottés ensemble, va de celui qui est placé le second dans l'ordre (l'antimoine), à celui qui est le premier à travers le fil du galvanomètre, ou du premier au second à travers leur point de contact.

frottait la surface du premier métal avec les mêmes points du second. Ainsi le plus ou moins de chaleur dégagée n'exerce aucune influence sur le phénomène. Le point essentiel pour avoir le plus d'électricité possible, c'est de séparer, aussi promptement qu'on le peut, les parties frottées, tout en maintenant le contact, afin d'empêcher la plus grande proportion des deux électricités de se recombiner immédiatement sans passer par le fil du galvanomètre.

M. Gaugain avait cru trouver dans la presque égalité qu'il a observée entre l'intensité de l'électricité développée par le frottement et celle de l'électricité dégagée dans les mêmes circonstances par une élévation de température égale à celle que ce frottement détermine, une preuve que le courant électrique est dû également dans les deux cas au réchauffement et que le frottement n'agit qu'indirectement en produisant ce réchauffement. Mais depuis qu'il a été bien constaté que la chaleur n'agit elle-même dans la production des courants thermo-électriques que par les changements moléculaires qu'elle détermine, il est bien plus naturel de voir dans le frottement un moyen direct de produire ces changements. Quant à l'égalité d'effet observée par M. Gaugain, elle provient de ce que les courants électriques étant dus à l'arrangement et à la nature relative des particules des corps en contact, leur intensité doit être la même, quelle que soit la cause qui agisse sur ces corps, pourvu qu'elle agisse avec la même puissance et que les corps restent les mêmes.

Voici, du reste, encore une expérience de M. Peltier, qui démontre que le plus léger changement dans la position d'équilibre des particules d'un circuit métallique fermé suffit pour produire un courant et par conséquent pour troubler l'équilibre des forces électriques. On forme un grand cercle avec un fil de cuivre non recuit mis en rapport avec un galvanomètre multiplicateur à fil court ; on a soin de soutenir ce cercle de distance en distance par des supports ; puis on le place alternativement dans le méridien magnétique, dans un plan perpendiculaire à ce méridien, ou dans une position intermédiaire, afin de pouvoir tenir compte de l'action inductive du magné-

tisme terrestre. L'équilibre de température étant bien établi, on soulève ou l'on abaisse une partie du fil; il se forme alors des flexions qui ne peuvent avoir lieu sans un déplacement de particules, et, par suite, sans qu'il y ait un courant électrique. Il arrive quelquefois qu'il n'y a aucun effet produit; cela a lieu probablement quand il se développe deux courants égaux et dirigés en sens contraire de chaque côté du point ébranlé. Lorsque cette circonstance se présente, il faut écrouir quelques portions d'un côté de l'arc au moyen de la percussion et de la torsion, ou bien les faire recuire. Cette cause d'inégalité suffit pour faire naître le courant par la simple flexion du fil. Les courants ne peuvent être attribués à l'induction terrestre, puisqu'ils se manifestent quelle que soit la position du circuit par rapport au méridien magnétique. Quant au sens du courant, il tient à des différences dans l'état moléculaire dont il est impossible de se rendre compte. Il faut, du reste, si peu déranger l'état moléculaire des corps pour troubler leur équilibre électrique, qu'on peut obtenir un courant de direction variable en frottant simplement le fil entre les doigts ou avec du drap; on peut le provoquer encore en le tirant à la filière après avoir eu soin de mettre ses deux bouts en communication avec le fil d'un galvanomètre multiplicateur.

Plus tard, M. Sullivan a réussi également à obtenir une légère déviation de l'aiguille d'un multiplicateur en réunissant les extrémités du fil de l'instrument par un fil formé de deux bouts consécutifs, l'un de laiton, l'autre de fer qu'il faisait vibrer, après l'avoir tendu de manière à lui faire rendre un son musical. Le courant cessait immédiatement avec la vibration, preuve que la chaleur qui aurait pu se dégager pendant la vibration ne concourt en rien au phénomène, puisqu'elle n'aurait pas pu disparaître instantanément. Avec un barreau d'antimoine soudé à un barreau de bismuth, de manière à former en tout une barre de 25 centimètres de longueur sur 10 millimètres de largeur et 7 millimètres d'épaisseur, l'effet est prononcé; il suffit pour mettre la barre en vibration de la frapper avec un morceau de fer, une lime par exemple. L'amplitude des déviations, soit l'intensité du courant développé,

paraissent dépendre de la manière dont les vibrations se propagent le long du fil. Il n'est pas nécessaire que la barre soit composée de deux métaux de nature différente pour obtenir par la vibration un courant électrique; il suffit que sa texture ne soit pas homogène. Ainsi on obtient un effet sensible avec une barre de fer dont une portion est d'un fer dur et cristallisé, l'autre d'un fer doux et fibreux. Ces résultats démontrent d'une manière évidente l'influence directe des mouvements moléculaires sur la production de l'électricité.

Enfin des expériences de M. Ermann montrent bien le rapport et partant ainsi l'indépendance qui existe entre le frottement et la chaleur dans la production des courants électriques. Ce physicien a trouvé, en combinant différents groupes de métaux de manière à en faire des couples thermo-électriques, qu'un frottement exercé à leur point de contact produit le même effet qu'une addition de chaleur appliquée au même point, c'est-à-dire détermine un courant si la température du point de contact est la même que celle du milieu ambiant, et augmente l'intensité du courant déjà existant si cette température est plus élevée. Cet effet, que Ermann appelle tribo-thermique, n'est semblable ni à celui de la chaleur de conductibilité ni à celui de la chaleur rayonnante. Sa production lorsque le frottement commence, et sa disparition quand il cesse, sont entièrement indépendantes de la durée de l'action qui lui donne naissance. Le physicien allemand semble croire que ces phénomènes tiennent à un genre particulier de vibration moléculaire excitée exclusivement dans les points frottés et se répandant dans le milieu conducteur aussi instantanément que le fait l'électricité.

§ 4. Dégagement de l'électricité dans les actions mécaniques autres que le frottement.

Le frottement n'est pas la seule action mécanique qui soit une source d'électricité. Toute cause qui détermine un mouvement moléculaire dans un corps solide en produit. Ainsi il suffit de couper par un corps tranchant, de limer ou de racler divers

corps tels que la gomme laque, le soufre, la résine, la cire, le suif, du chocolat, etc., pour que les fragments en tombant sur un électroscope, le chargent d'électricité et même donnent des étincelles, et les fragments détachés sont positifs. Il suffit de légères différences dans le mode de désagrégation pour faire varier la nature de l'électricité. Ainsi avec un couteau non aiguisé, le bois de hêtre chauffé donne des fragments positifs, et il en donne de négatifs quand il est froid; avec un couteau aiguisé les fragments sont négatifs dans les deux cas également. De même quand on racle de la cire à cacheter avec des lames métalliques bien aiguisées, les parties détachées sont négatives, tandis qu'elles sont positives quand le tranchant est émoussé. Le nombre des faits de détail, décrits par différents expérimentateurs sur ce sujet, est tellement considérable qu'il suffit d'en énoncer quelques-uns pour en comprendre l'importance, d'autant plus qu'on ne les a pas rattachés encore à aucune loi générale. Nous nous bornerons donc à insister sur la production de l'électricité dans une espèce de désagrégation très-remarquable, celle qui a lieu dans le clivage des cristaux. C'est encore à M. Becquerel qu'on doit l'analyse de ce mode de dégagement de l'électricité.

Lorsque l'on clive rapidement une lame de mica dans l'obscurité, on aperçoit toujours une faible lueur phosphorique dont la cause a été un mystère jusqu'à ce qu'on ait fait l'expérience en fixant une tige isolante à chacune des faces opposées de cette lame, afin de pouvoir séparer les deux faces et les présenter à un électroscope. On trouve alors que chacune des faces séparées possède un excès d'électricité contraire, dont l'intensité est d'autant plus grande que la séparation a été plus rapide. Ce phénomène ayant toujours lieu, quelque mince que soit la lame de mica, on peut en conclure qu'il se reproduirait encore à la limite, c'est-à-dire s'il était possible de séparer l'une de l'autre deux molécules. Ces faits prouvent deux choses :

1° Que les molécules possèdent au moins deux faces douées de facultés différentes; car, sans cela, on ne voit pas pourquoi une des lames donne une électricité et l'autre lame l'électricité contraire; 2° que chacune de ces faces manifeste une polarité

électrique à l'instant où l'on détruit la force d'agrégation. Les actions chimiques, comme nous le prouverons, conduisent aux mêmes conséquences.

Le mica n'est pas la seule substance qui possède la propriété électrique de clivage, nous la retrouvons dans le talc feuilleté du Saint-Gothard, ainsi que dans toutes les substances cristallisées rangées parmi les corps mauvais ou médiocres conducteurs. On peut donc poser en principe que toutes les fois que l'on sépare deux molécules en contact, chacune d'elles emporte un excès d'électricité contraire, pourvu toutefois que les corps auxquels elles appartiennent ne soient pas tellement bons conducteurs que la recomposition des deux électricités devenues libres, suive immédiatement leur séparation.

Pour réussir dans ces expériences, il faut enlever aux cristaux la couche d'eau hygrométrique qui adhère ordinairement à leur surface, et porter rapidement les parties séparées à l'électroscope.

Deux lames de mica détachées du même cristal, rapprochées l'une de l'autre et légèrement pressées jusqu'à les faire adhérer, sortent de la compression chacune avec l'état électrique qu'elle possédait à l'instant du clivage. L'effet est particulièrement marqué quand on élève légèrement la température de celle des lames qui possédait l'état négatif en sortant du clivage.

Il est facile d'expliquer maintenant pourquoi l'on ne peut recueillir d'électricité libre quand on broie, dans un mortier d'agate, des cristaux de substances conduisant mal l'électricité, car il y a recomposition immédiate des deux électricités contraires dégagées sur deux lamelles contiguës. C'est par le même motif que l'on n'obtient aucun effet électrique lorsqu'on brise des corps cristallisés irrégulièrement ou formés de parties groupées confusément, comme des tubes de verre, des bâtons de gomme laque, etc., etc. — On conçoit de même pourquoi l'on n'observe aucun signe d'électricité libre dans le clivage d'un cristal conducteur de l'électricité, comme la galène, les pyrites et autres, attendu que la vitesse de séparation ne peut jamais être assez grande pour empêcher la recomposition des deux électricités à l'instant où elles se séparent. A défaut d'élec-

tricité libre, on pourrait constater la présence de cet agent au moyen des effets électriques de mouvement; à cet effet, le cristal devrait être mis en communication par deux points avec les bouts du fil d'un galvanomètre. Il est infiniment probable qu'en clivant rapidement le cristal, les deux électricités provenant de la destruction de l'attraction moléculaire, produiraient, en suivant le fil pour se recombiner, un courant qui réagirait sur l'aiguille aimantée.

Les effets électriques qu'on obtient dans la solidification des corps fondus tiennent, comme les précédents, à une désagrégation, c'est-à-dire à la destruction de l'attraction moléculaire entre deux substances soit homogènes, soit hétérogènes. Ainsi, si l'on verse dans un verre conique préalablement chauffé, du soufre en fusion, et que l'on plonge dedans, avant qu'il soit refroidi, un tube de verre, on trouve, après la solidification, que, lorsqu'on enlève le cône de soufre, le vase de verre possède un excès d'électricité négative et le soufre un excès d'électricité positive. Le chocolat, l'acide phosphorique après leur solidification dans un verre donnent des effets semblables. M. Gay-Lussac a remarqué que l'adhérence des corps entre eux d'abord, puis leur séparation par l'inégalité de leur retrait, comme cela a lieu entre le verre et le soufre, sont des conditions indispensables pour que l'on obtienne de l'électricité après la fusion et la solidification d'un corps. Ainsi les métaux qui ne réunissent point ces conditions n'en manifestent aucune trace après leur solidification dans du verre. M. Gay-Lussac conclut de ces observations et de quelques autres encore que la congélation, soit la solidification n'est nullement, comme on l'avait cru, une source d'électricité, mais qu'elle n'est qu'un moyen de produire dans quelques cas une désagrégation moléculaire qui est elle-même la cause de l'électricité dégagée.

M. Boettiger est arrivé à la même conclusion que Gay-Lussac, en amenant à l'état de fusion dans un creuset de platine du sulfate double de cuivre et de potasse. Il n'a pas observé la moindre trace d'électricité pendant l'acte de la cristallisation; mais le creuset manifestait des signes d'électricité positive dès que le sel se contractait en pétillant et en se détachant du

métal. Il résulte de toutes ces expériences qu'il faut nécessairement une séparation violente de la masse fondue d'avec les parois du vase qui la renferme, pour qu'il y ait dégagement d'électricité.

C'est évidemment à l'électricité qui accompagne tout changement dans la position relative des particules que sont dus les phénomènes lumineux qui se manifestent dans la cristallisation de certains corps, et dont M. Henri Rose a fait une étude toute particulière. L'acide arsénieux est la première substance sur laquelle on ait observé une phosphorescence lorsque de l'état vitreux il passe à l'état opaque en cristallisant. M. Rose a étendu l'observation aux sulfates de potasse et de soude et à d'autres sels encore. Mais il a remarqué que la lumière qui accompagne la cristallisation dépend beaucoup des circonstances dans lesquelles a lieu cette cristallisation, et en particulier du milieu dans lequel le sel se dissout, ce qui influe, en effet, sur la position relative des particules.

Le simple écartement des particules, tel qu'il a lieu dans les corps élastiques comprimés au moment où la pression cesse, peut aussi, sans qu'il soit nécessaire qu'il y ait désagrégation, être accompagné d'un développement d'électricité. Ainsi Libes a observé le premier, qu'en posant sur un disque de bois recouvert de taffetas enduit d'une couche de résine élastique, un disque de laiton fixé à un manche de verre, avec la précaution de ne lui faire éprouver aucun frottement, si l'on presse légèrement le taffetas gommé, le disque de métal prend un excès assez considérable d'électricité négative ; les effets sont inverses en pressant avec frottement ; des disques d'argent, de zinc, etc., ont donné des effets semblables. Cette différence entre les effets de pression et ceux de frottement est des plus remarquables, et n'a pu être expliquée jusqu'ici qu'en admettant que le rapprochement des particules libère l'électricité opposée à celle qui est dégagée par leur écartement.

Plus tard, Haüy trouva qu'un cristal de spath d'Irlande et quelques autres substances minérales jouissent de la propriété de devenir électriques par la simple pression des doigts; mais cette propriété n'est pas aussi restreinte qu'il le pensait, car,

ainsi que l'a prouvé M. Becquerel, elle appartient à tous les corps, même à ceux qui sont conducteurs, pourvu qu'ils soient isolés. Pour mettre le fait en évidence, on forme, avec les substances que l'on veut essayer, des petits disques d'une épaisseur de quelques millimètres que l'on adapte à des manches parfaitement isolants; on prend un manche dans chaque main, et l'on presse les disques l'un contre l'autre; après les avoir retirés du contact, on les présente au disque de clinquant de l'électroscope de Coulomb préalablement électrisé; on trouve alors que les deux corps possèdent une électricité contraire, pourvu toutefois que le corps soit mauvais conducteur; le liége et le caoutchouc, pressés l'un contre l'autre, donnent le premier l'électricité positive, le second l'électricité négative.

Les substances minérales cristallisées ayant un aspect vitreux, telles que la chaux sulfatée, la chaux fluatée, la baryte sulfatée, prennent l'électricité positive quand elles sont pressées avec le disque de liége. Des fruits, tels que l'orange, comprimés par un disque de même nature, lui communiquent, au contraire, un excès d'électricité positive; à mesure que le fruit se dessèche et perd de son élasticité, la faculté de s'électriser diminue. Plusieurs causes tendent à modifier le dégagement de l'électricité par pression : la première est le plus ou moins de conductibilité des corps. Si l'on emploie, par exemple, un disque de moelle de sureau et un disque de métal, il n'y a aucun effet produit, et il en est encore de même toutes les fois que des substances pressées sont conductrices de l'électricité. Il paraît qu'à l'instant où l'on exerce la pression, il se forme un nouvel état d'équilibre entre les deux électricités qui composent l'électricité naturelle des molécules en contact; tant que dure la pression, ces deux électricités sont dissimulées l'une par l'autre; ainsi, malgré leur attraction réciproque et leur tendance à passer d'un corps dans l'autre, il se trouve dans la pression une force qui neutralise ces deux actions. Quand les corps sont bons conducteurs, dès l'instant qu'une diminution de pression a lieu, les deux électricités se recombinent instantanément, quelle que soit la vitesse de séparation, tandis que, lorsque l'un d'eux n'est pas bon conducteur, une diminution

de pression n'entraîne pas immédiatement cette recomposition, laquelle met plus ou moins de temps à s'effectuer, suivant le degré de conductibilité des deux corps pressés. L'expérience suivante met en évidence l'influence de la vitesse de séparation dans les effets électriques de pression. Pressez un disque de liége sur une orange, et retirez-le ensuite vivement, il emporte avec lui un excès d'électricité positive assez considérable; mais si on ne le retire que lentement, on trouve que cet excès va en diminuant; et si la vitesse de séparation est très-lente, il devient à peine sensible.

La chaleur modifie les phénomènes de pression. Si l'on prend un bouchon de liége bien sec, et qu'on le coupe par la moitié avec un instrument tranchant, en pressant les deux parties séparées l'une contre l'autre, assez ordinairement elles prennent chacune un excès d'électricité contraire; mais il arrive souvent aussi qu'elles ne sont pas électrisées. Si l'on élève de quelques degrés la température de l'un des deux disques, celle de l'autre restant constante, on trouve que la partie chauffée prend à l'autre l'électricité négative. Deux morceaux de spath d'Islande, à la même température, ne sont pas électrisés par pression; mais il suffit d'une différence de température très-légère pour leur donner cette faculté. A température égale, les deux disques de liége ne doivent leurs facultés électriques de pression qu'à une différence dans l'état de leur surface; celle qui a le plus d'aspérités prend toujours à l'autre l'électricité négative. L'état des surfaces dans les corps mauvais conducteurs influe aussi sur leur qualité conductrice, car le spath d'Islande, qui est rangé parmi les corps les plus mauvais conducteurs (puisqu'il conserve pendant des semaines entières l'électricité qu'on lui a communiquée), devient suffisamment bon conducteur quand on lui a enlevé son poli, pour qu'il soit nécessaire de l'isoler si l'on veut qu'il conserve son électricité. Les aspérités déterminent donc non-seulement l'électricité que doit prendre un corps mauvais conducteur, mais elles modifient encore sa conductibilité électrique.

Pour mesurer les effets électriques de pression, il faut un appareil qui permette à volonté de varier les causes qui influent

sur leur production. L'expérience prouve que les intensités croissent proportionnellement aux pressions, pour des pressions qui ne dépassent pas 10 kilogrammes. Cette loi s'étend-elle à des pressions plus élevées? Il est difficile de répondre à cette question. Nous avons vu que M. Péclet avait entrepris quelques recherches à cet égard, en vue particulièrement de déterminer l'influence de la pression, de la vitesse, etc., sur le dégagement de l'électricité dans le frottement; mais les résultats qu'il a obtenus ne peuvent être appliqués en rien au cas actuel. M. Becquerel croit qu'il est possible que la quantité d'électricité que prend chaque corps pendant qu'on le comprime soit dépendante du degré de l'attraction que les molécules des surfaces exercent les unes sur les autres; mais comme on ne peut apprécier les rapports existant entre l'attraction et la pression, ou le rapprochement plus ou moins grand des molécules, il est impossible de déterminer les rapports entre les quantités d'électricité correspondantes. La difficulté de séparer instantanément les deux corps comprimés, sans passer par des pressions intermédiaires successives, rend pour ainsi dire impossible la détermination des rapports en question.

On serait peut-être porté à croire que la chaleur dégagée dans la pression est la cause du développement de l'électricité; l'expérience suivante, due à M. Becquerel, prouve le contraire en même temps qu'elle montre l'influence du rapprochement des molécules pour augmenter le dégagement de l'électricité quand on vient à séparer les corps. Deux corps se trouvant sous l'action d'une certaine pression, si l'on vient à diminuer celle-ci de moitié, l'effet de la pression perdue subsiste pendant un temps dont la durée dépend du degré de conductibilité, de sorte que si l'on retire immédiatement ces corps de la compression, chacun d'eux emporte avec lui un excès d'électricité contraire, plus grand que celui qui est dû à la pression restante. Maintenant, au lieu de séparer les corps lorsque la pression a été diminuée, on rend celle qui a été enlevée, et l'on répète plusieurs fois ce mode d'action. Une lame de spath d'Islande et un disque très-mince de liége ont donné, par exemple, les résultats suivants. Ces deux corps étant d'abord sous la

pression de 4 kilogrammes, on a réduit celle-ci de moitié sans déranger le contact; et une minute après on les a séparés ; la tension électrique de chaque disque était représentée par 170 ; si la séparation eût eu lieu pendant la pression de 4 kilogrammes, la tension aurait été de 250, et pendant la pression de 2 kilogrammes, de 125, moitié de la précédente; on voit donc que, dans le premier cas, l'effet produit par la pression qui a été perdue subsiste encore en partie. Au lieu de séparer les corps quand on a réduit la pression de 4 à 2, on leur rend la pression qui a été enlevée, et l'on répète plusieurs fois ce jeu alternatif de pression simple et de pression double. On trouve, en définitive, que le disque de liége ne possède jamais plus que l'intensité 250, correspondante à la pression la plus forte.

Parmi les actions moléculaires, il en est une que M. Becquerel avait cru être une source d'electricité, c'est l'action capillaire; mais il a reconnu que l'électricité dégagée dans les phénomènes capillaires pouvait tenir aux nombreux effets qui accompagnent la production de ces phénomènes, tels que le frottement des liquides contre les parois des espaces capillaires, à l'action chimique qui a lieu dans quelques cas, tels que celui où l'on obtient un courant électrique par la pénétration d'un acide dans les pores du platine spongieux, etc.

En résumé, nous pouvons établir, comme un principe rigoureusement démontré par l'expérience, que non-seulement le frottement, mais toute action mécanique qui trouble l'équilibre moléculaire en dérangeant de leurs positions naturelles les particules d'un corps, devient une cause de production d'électricité; électricité dont la manifestation est plus ou moins sensible, suivant les conditions diverses dans lesquelles se trouvent les corps soumis à ces actions mécaniques.

§ 5. Considérations générales sur le dégagement de l'électricité par les actions mécaniques, et sur ses rapports avec le dégagement de la chaleur.

Nous avons établi dans les paragraphes qui précèdent le principe général que tout ébranlement imprimé à un corps

d'où résulte un dérangement dans l'état de son équilibre moléculaire est accompagné d'une production d'électricité qui se manifeste plus ou moins facilement, suivant les conditions de conductibilité et de constitution physique des corps ébranlés. Nous avons rapporté les expériences de divers physiciens qui montrent la grande analogie qui existe entre les actions mécaniques et l'action de la chaleur dans le développement de l'électricité, et qui nous conduisent à reconnaître que ce qui détermine la nature comme l'intensité de l'électricité, c'est bien plus le corps soumis à l'action que l'action elle-même. Voilà donc un motif de plus d'admettre que les particules sont, comme nous l'avons déjà dit souvent, douées d'une polarité électrique, laquelle, dans l'état naturel, est dissimulée par l'équilibre qui s'établit entre les polarités égales et contraires de toutes les particules d'un même corps. L'action mécanique, comme la chaleur, vient troubler cet équilibre, soit en changeant la position relative des particules, soit aussi en détruisant l'uniformité de leurs mouvements naturels de rotation; conditions, l'une et l'autre, nécessaires pour l'équilibre. L'action mécanique fait plus : en désagrégeant dans quelques cas les particules, elle les isole, et alors elle permet la manifestation de leur polarité électrique; c'est ce qui est surtout sensible dans les substances cristallisées où les poles ont une position semblable sur la même face de clivage. C'est pourquoi quand on clive une lame de mica, on rend libre sur l'une des faces, l'électricité positive de toutes les particules de cette face, et sur l'autre, par conséquent, l'électricité négative de toutes ses particules également.

La production d'un courant électrique, telle que Peltier l'a obtenue en imprimant à une portion d'un conducteur faisant partie d'un circuit fermé un mouvement de vibration, ne peut s'expliquer qu'en admettant que cette action vibratoire permet aux particules qui y sont soumises de s'orienter suivant leur polarité, effet semblable à celui que produirait le passage d'un courant artificiel; et de faire naître un courant par le seul fait de cette orientation. Cette polarité, du reste, a été mise en évidence d'une manière tout à fait remarquable par M. Volpicelli.

La manière d'opérer du savant Italien consiste à déterminer dans une tige métallique une vibration qui se communique à une couche isolante résineuse dont l'une des extrémités de cette tige est recouverte. C'est en faisant glisser, tantôt dans un sens, tantôt dans un sens contraire, contre un anneau métallique isolé la tige métallique dans la partie non recouverte d'une couche isolante, que les vibrations y sont produites pour se propager de là à la couche résineuse. On observe que, lorsque la portion recouverte de cette couche est celle qui est en avant dans le mouvement progressif imprimé à la tige, c'est d'électricité négative que se charge la partie métallique de cette dernière, preuve que cette électricité est aussi celle que prend la surface intérieure de la couche isolante. Quand le mouvement a lieu dans l'autre sens, l'électricité positive remplace la négative. Dans chacun des deux cas on peut s'assurer que la surface extérieure de la couche isolante prend une électricité contraire à celle dont se charge la surface intérieure. Il suffit, pour le constater, de recouvrir la couche d'un petit anneau métallique, qui est isolé ainsi de la tige avec laquelle il n'a aucune communication métallique. Un fil de métal très-fin, isolé dans l'air, fait communiquer cet anneau avec un électroscope; on établit de la même manière la communication entre l'électroscope et la partie métallique de la tige. Quand on veut recueillir l'électricité de la surface extérieure de la couche isolante, il est préférable de faire communiquer avec le sol la tige métallique et le support qui porte l'anneau contre lequel on la frotte.

On peut recouvrir les deux extrémités de la tige également d'une couche isolante, et la faire glisser en la tenant à la main dans une portion de sa longueur où la surface métallique est à découvert. On observe que dans chaque excursion de la tige, l'électricité de la surface externe de la couche isolante est négative à l'extrémité qui est en avant dans le mouvement imprimé, et positive à l'extrémité qui est en arrière. Cette expérience démontre bien que la direction suivant laquelle se propage la vibration longitudinale imprimée à la tige, influe sur la polarité que manifestent les molécules de la substance isolante auxquelles cette vibration est communiquée.

Quelques essais faits avec des tiges de divers métaux semblent établir des différences entre eux quant à leur faculté de développer par la transmission des vibrations qu'ils éprouvent, la polarité sous la couche isolante. Le fer et l'acier sont, à cet égard, très-inférieurs au laiton et à l'argent. Il est également désavantageux que l'anneau métallique sur lequel glisse la tige présente des rugosités; il faut que les deux surfaces frottées l'une contre l'autre soient bien polies. Une atmosphère sèche et froide contribue beaucoup au succès des expériences. Il faut prendre toutes les précautions possibles pour qu'il n'y ait pas d'électricité dégagée dans le contact des mains et des couches isolantes. On doit avoir soin également d'enlever, avant d'opérer, la couche mince d'humidité qui recouvre presque toujours la surface de la substance isolante.

M. Volpicelli a trouvé encore qu'en remplaçant aux extrémités de la tige métallique la couche de résine par une couche de soufre, on obtient les mêmes résultats. Si l'on recouvre de tubes de verre les extrémités de la tige, on obtient également des effets semblables à ceux que produisent des tiges toutes de verre, c'est-à-dire une polarité inverse de celle que manifestent la résine et le soufre. Enfin, lorsqu'on se sert d'une tige entièrement de résine ou de soufre, on remarque que, si en passant sur l'anneau qui la frotte elle abandonne une petite partie de sa substance, ce qui arrive assez souvent, surtout par un temps chaud, il y a toujours une polarité développée, mais qu'elle est renversée; elle redevient ce qu'elle était précédemment si l'on change le support. Il est assez curieux de voir dans ce cas la polarité s'affaiblir graduellement, devenir nulle, puis changer de nature. Ce phénomène particulier ne se présente jamais avec les tiges de verre qui, en effet, ne peuvent pas être désagrégées. Un fait important, c'est que les expériences de M. Volpicelli réussissent aussi bien et même mieux dans le vide que dans l'air, preuve que l'électricité de l'air n'y est pour rien.

Il est assez remarquable que la polarité se développe d'une manière beaucoup plus prononcée dans les tiges de verre que dans celles de résine et de soufre, qui, en effet, vibrent beau-

coup moins bien que les premières. Ajoutons enfin qu'en recouvrant de diverses substances le support sur lequel s'opère le frottement de la tige, on n'altère nullement le sens de la polarité, qui dépend toujours de la direction dans laquelle a lieu l'excursion de la tige. C'est une preuve que le phénomène est bien le résultat d'une vibration longitudinale imprimée à la tige et non du frottement qu'elle éprouve en passant sur le support.

Il semblerait donc résulter des recherches de M. Volpicelli que la vibration imprimée à une substance isolante par l'intermédiaire d'une tige vibrante, permettrait aux molécules de cette substance de se disposer de façon à constituer une chaîne polaire perpendiculaire à l'épaisseur de la couche, et présentant, par conséquent, à ses deux extrémités, les électricités contraires. Le sens de la vibration influerait sur le sens dans lequel seraient tournés les pôles de chacune des particules. Une action mécanique produirait donc ici un effet tout à fait analogue à celui d'une action calorique.

Ainsi voilà la chaleur et les actions mécaniques capables de déterminer dans les corps un état électrique identique, ce qui surprend moins depuis que les physiciens, comme nous l'avons déjà remarqué, ont été conduits par des faits d'un tout autre ordre à ce qu'on a appelé la théorie mécanique de la chaleur. Mais déjà auparavant M. Becquerel avait signalé l'analogie qui existe entre les effets de chaleur et les effets électriques produits par le frottement; en les étudiant comparativement, il était arrivé à démontrer que quand les corps sont de même nature, mais de mauvais conducteurs de la chaleur, et ne différant entre eux que par l'état de leurs surfaces, la surface qui s'échauffe le plus, prend l'électricité négative, et celle qui s'échauffe le moins, la positive. Ce principe important nous servira plus loin, concurremment avec d'autres auxquels nous conduira l'étude de l'action chimique considérée comme source de l'électricité, à établir certaines différences entre les propriétés et l'action du pôle positif et celles du pôle négatif de chaque particule. Car si, à intensité égale, il n'existait pas dans la puissance extérieure de l'un des pôles, com-

parée à celle de l'autre une certaine différence, il est un grand nombre de faits dans les phénomènes électro-chimiques qui seraient inexplicables; c'est ce que nous montrerons en cherchant à établir directement les preuves de cette différence, après avoir achevé l'étude des sources artificielles de l'électricité.

Liste des principaux travaux relatifs aux sujets traités dans ce chapitre:

Biot. — Frottement des conducteurs imparfaits. — *Traité de phys. expérimentale et mathématique.* T. II, p. 354.

Heintz. — État électrique particulier du verre. — *Annales de l'élect.* T. III, p. 551, et *Annales de chim.* T. LIX, p. 305.

Loevel. — Propriétés du verre. — *Ann. de ch. et de phys.* T. XXIX, p. 110.

Hauy. — Électricité par le frottement des minéraux. — *Ann. de ch. et de phys.* T. VIII, p. 383. — Électricité par pression. — *Idem.* T. V, p. 95.

De la Rive. — Électricité par le frottement des métaux. — *Bibl. univ.* T. LIX, p. 13.

Péclet. — Influence de l'action chimique nulle dans l'électricité par frottement. — *Ann. de ch. et de phys.* T. LXXI, p. 83. — Lois de l'électricité par frottement. — *Idem.* T. LVII, p. 337.

Schoenbein. — Papier électrique. — *Arch. des sc. phys.* T. II, p. 156.

Becquerel. — Électricité par le frottement des métaux soit en masse, soit en poudre. — *Ann. de ch. et de phys.* T. XXXVIII, p. 113. — Électricité par pression et par le clivage des cristaux. — *Idem.* T. XXII, p. 5; t. XXXVI, p. 265. — Électricité produite par les actions capillaires. — *Idem.* T. XXIV, p. 337. — Comparaison entre l'électricité et la chaleur dégagée par frottement. — *Idem.* T. LXX, p. 324.

Colladon. — Effets mécaniques dans les filatures, de l'électricité dégagée par le frottement. — *Bibl. univ.* (1836). T. I, p. 362.

Dessaigne. — Électricité par immersion dans le mercure. — *Ann. de ch. et de phys.* T. II, p. 59.

Perego. — *Idem.* — *Arch. de l'électricité.* — T. II, p. 395.

Armstrong. — Dégagement d'électricité par l'expansion de la vapeur. — *Arch. de l'élect.* T. I, p. 145.

Peltier. — Électricité de la vapeur à haute pression. — *Idem.* T. I, p. 474.

Faraday. — Électricité dégagée par le frottement de l'eau, des autres liquides et des poudres. — *Idem.* T. III, p. 369, et *Ann. de ch. et de phys.* (*Nouvelle série*). T. X, p. 88.

Gaugain. — Électricité développée par le frottement de deux métaux. — *Comptes rendus de l'Acad. des sc. de Paris.* T. XXXVI, p. 541; et *Arch. des sc. phys.* T. XXII, p. 381.

Peltier. — Courant produit dans un fil conducteur par un dérangement moléculaire. — *Ann. de ch. et de phys.* T. LX, p. 261.

Sullivan. — Courants produits par les vibrations des métaux. — *Arch. de l'électr.* T. X, p. 480.

Ermann. — Influence du frottement sur les effets thermo-électriques. — *Arch. de l'élect.* T. V, p. 477.

H. Rose. — Lumière qui accompagne la cristallisation. — *Ann. de Pogg.* T. LII, p. 443.

Gay-Lussac. — Électricité produite par la séparation de corps adhérents. — *Ann. de ch. et de phys.* T. VIII, p. 161.

Volpicelli. — Polarité électrostatique. — *Comptes rendus de l'Acad. des sc. de Paris.* T. XXXVIII (15 mai 1854). *Arch. des sc. phys. et natur.* (*Bibl. univ.*). T. XXVIII, p. 265.

Riess. — Détails divers sur l'électricité par frottement. — *Traité de l'électricité par frottement.* T. II, p. 362 et suiv.

Priestley. — Relation d'anciennes expériences sur l'électricité par frottement. — *Histoire de l'électricité.*

CHAPITRE III.

ÉLECTRICITÉ PRODUITE PAR LES ACTIONS CHIMIQUES.

§ 1. Production d'électricité par l'action chimique des liquides sur les solides. — Couple et pile voltaïques.

Toute action chimique est accompagnée d'une perturbation dans l'état d'équilibre des molécules d'un corps, et doit, par conséquent, être une cause de dégagement d'électricité ; c'est même de toutes la plus puissante, quoiqu'elle ne semble pas toujours l'être ; ce qui tient à la facilité avec laquelle les deux électricités tendent le plus souvent à se recomposer immédiatement. Aussi faut-il, dans ce mode de production, distinguer, comme dans les autres, l'électricité produite de l'électricité perçue.

Déjà Lavoisier et Laplace avaient cherché, avec l'aide du condensateur, à obtenir des signes d'électricité de tension par l'action sur le zinc de l'acide sulfurique étendu ; plus tard, Fabroni, Wollaston et Parrot avaient attribué aux actions chimiques que les liquides exercent sur les métaux, la production de l'électricité dans la pile voltaïque ; mais ce n'est que depuis la découverte du galvanomètre multiplicateur qu'on a réussi à prouver, par des expériences directes et concluantes, que toute action chimique donne naissance à un courant électrique. C'est en 1823 qu'Oersted remarqua que si l'on fixe aux extrémités d'un galvanomètre deux pièces d'un même métal, telles que deux lames de zinc, et qu'on les plonge l'une après l'autre dans un acide étendu, on observe une déviation de l'aiguille qui indique la production d'un courant électrique. Becquerel trouva plus tard qu'on détermine également un courant en plongeant dans une solution acide ou alcaline, les deux bouts du fil de

cuivre d'un galvanomètre; mais il faut, pour que le courant ait lieu, que le liquide exerce une action chimique sur la partie immergée du fil; le même physicien observa en outre que le sens du courant paraissait dépendre de celui des deux bouts du fil qui était le plus vivement attaqué, et qu'ainsi c'était de celui qui était plongé le dernier, ou qui avait le plus de points de contact avec le liquide que partait le courant, soit l'électricité positive, pour se rendre dans le liquide, le traverser, puis venir à l'autre bout, et revenir au premier en traversant le fil de l'instrument. Yelin, à peu près à la même époque, publia une série d'expériences faites sur un grand nombre de métaux, desquelles il résultait qu'en plongeant deux morceaux du même métal dans divers liquides acides et alcalins, on observait des courants dont le sens et l'intensité paraissaient dépendre de celui des morceaux qu'on avait plongé le premier, et de la nature relative du liquide et du métal.

Un grand nombre de physiciens vinrent bientôt ajouter des preuves nombreuses, soit directes, soit indirectes, à celles que nous venons d'indiquer, pour démontrer d'une manière péremptoire que toute action chimique donne naissance à de l'électricité qui se manifeste, ou à l'état statique, soit de tension, ou à l'état dynamique, soit de courant.

Pour mettre de l'ordre dans l'étude que nous allons faire de cette source électrique, nous examinerons le dégagement de l'électricité auquel elle donne naissance en prenant successivement les diverses formes sous lesquelles peut avoir lieu l'action chimique. Cette action peut être celle d'un liquide sur un solide, celle de deux dissolutions l'une sur l'autre, celle des gaz s'exerçant sur les solides et sur les liquides sous certaines conditions; à ces trois formes nous ajouterons celle qui constitue le phénomène de la combustion que nous étudierons séparément, à cause du caractère particulier qui lui est propre. Nous commencerons par la forme que nous avons indiquée la première : savoir, l'action d'un liquide sur un solide; ce sera l'objet de ce paragraphe. Ce mode de production de l'électricité est le plus remarquable de tous, soit en lui-même, soit parce qu'il est la cause du pouvoir électrique de la pile voltaïque.

Mais avant d'en aborder l'étude, il est nécessaire de signaler une difficulté sérieuse qu'elle présente. On avait admis longtemps, et beaucoup de physiciens admettent encore que le contact de deux corps solides conducteurs et hétérogènes est une source d'électricité, l'un des corps se constituant, par le fait seul de leur contact, dans un état positif, et l'autre dans un état négatif. Or, comme pour percevoir l'électricité produite dans l'action chimique, il faut le plus souvent mettre en contact deux conducteurs solides de nature différente, on a voulu attribuer à ce contact et non à l'action chimique, la production de l'électricité. Toutefois nous montrerons, que dans ces cas, c'est l'action chimique qui est la véritable source de l'électricité, et que le contact n'est qu'une condition le plus souvent nécessaire, mais pas toujours indispensable à la manifestation des signes électriques qu'il est par lui-même incapable de développer; car nous verrons que cette manifestation peut avoir lieu par l'effet de l'action chimique seule sans contact. Enfin nous consacrerons un paragraphe de ce chapitre à l'étude plus spéciale de tous les faits qu'on a allégués en faveur de la théorie du contact; nous chercherons à démontrer qu'ils sont faciles à expliquer sans qu'il soit nécessaire d'admettre cette théorie, mais qu'ils sont une conséquence des divers modes d'action qui produisent l'électricité; nous examinerons dans ce même chapitre les diverses théories électro-chimiques, en exposant celle qui nous paraît le mieux en accord avec les phénomènes, dans l'état actuel de la science. Venons-en maintenant à l'objet même de ce paragraphe.

Pour bien analyser les effets électriques qui résultent de l'action chimique des liquides sur les corps solides, il faut commencer par opérer avec l'électroscope condensateur. M. Becquerel, qui le premier a fait des expériences de cette manière, plaçait sur le plateau d'un condensateur une capsule de métal remplie d'un liquide, puis il plongeait dans ce liquide l'extrémité d'une lame métallique dont il tenait l'autre bout entre les doigts. Suivant la nature relative des deux métaux et du liquide interposé entre eux, il trouvait sur le plateau du condensateur, tantôt de l'électricité positive, tantôt de la négative. Si la capsule

était de platine, quelle que fût la nature du liquide et celle du métal tenu entre les doigts, l'électroscope indiquait toujours que la capsule avait pris de l'électricité positive. Avec une capsule de cuivre, les signes étaient tantôt positifs, tantôt négatifs, selon que le métal plongé dans le liquide était plus ou moins attaqué par ce liquide lui-même. Il en était de même avec une capsule en bois remplie d'eau et en contact immédiat avec le plateau supérieur du condensateur; l'eau, la capsule et par conséquent le plateau prenaient l'électricité positive quand on plongeait une lame plus oxydable que le laiton du condensateur; le plateau prenait l'électricité négative avec des lames moins oxydables que lui. Tous ces résultats s'expliquent très-bien en partant du principe que, lorsqu'un liquide attaque un métal, le liquide se charge d'électricité positive et le métal de négative. Quand les expériences sont faites avec la capsule de platine, il n'y a d'action chimique que sur la lame de métal qu'on plonge dans le liquide, si du moins celui-ci n'exerce aucune action sur le platine; le liquide se charge ainsi d'électricité positive qui se répand dans le platine et de là sur le plateau du condensateur, tandis que l'électricité négative sort par les doigts avec lesquels on tient le métal. Si la capsule, au lieu d'être de platine, est faite d'un métal attaquable par le liquide, il y a alors deux actions, celle du liquide sur le métal de la capsule et celle du même liquide sur la lame métallique qu'on y plonge. En vertu de la première action, la capsule se charge d'électricité négative, et la positive se répand dans le liquide d'où elle tend à sortir par la lame métallique qui communique par les doigts avec le sol; en vertu de la seconde, cette lame prend l'électricité négative qui s'en va dans le sol, tandis que l'électricité positive se répand dans le liquide et passe de là dans la capsule, pour affecter le condensateur. Celui-ci doit, en vertu de cette double action, recevoir à la fois de l'électricité négative et de la positive, et suivant que ces deux électricités ont une intensité égale ou différente, il donne des signes électriques ou nuls, ou négatifs, ou positifs. Le premier cas se réalise quand la lame plongée est de même nature que la capsule, le second quand le métal de la capsule est plus

attaqué que celui de la lame, le troisième quand c'est le métal de la lame qui est plus attaqué que celui de la capsule.

Pour éviter qu'on puisse attribuer tout ou partie des effets obtenus, au contact de la capsule avec le plateau du condensateur, il faut que celui-ci soit du même métal que la capsule; de platine, si celle-ci est en platine, de cuivre si elle est en cuivre, de zinc si elle est en zinc. Les phénomènes se passent exactement de la même manière. Du reste, dans toutes ces expériences on peut employer un condensateur dont le plateau soit en cuivre doré avec soin, ou en cristal bien aplani recouvert d'une mince couche d'or. On se sert alors d'une capsule de platine pour y placer le liquide de façon que tout en étant isolée on puisse la mettre en communication métallique[1] avec l'un des plateaux du condensateur, après s'être assuré qu'il n'y a point d'électricité développée dans son contact avec le plateau. Puis on plonge successivement dans le liquide les diverses lames métalliques attaquables par ce liquide, en les tenant par les doigts.

Nous citerons encore une expérience de M. Matteucci, qui démontre de la manière la plus directe le dégagement d'électricité qui accompagne l'action chimique d'un liquide sur un métal, dans un cas où il n'y a pas possibilité de faire intervenir un effet dû au contact de deux métaux différents. On unit à l'un des plateaux d'un condensateur en cuivre, au moyen d'un fil, également en cuivre, une large lame de ce métal qu'on fait descendre et plonger dans l'eau d'un puits en la soutenant avec un cordon de soie; l'autre plateau du condensateur communiquant avec le sol. Après quelques instants de contact on trouve le condensateur chargé d'électricité négative. Si l'on verse une petite quantité d'acide sulfurique ou chlorhydrique dans l'eau du puits, les signes électriques sont encore plus prononcés. Lorsque la lame, au lieu d'être plongée dans l'eau du puits, est mise dans le liquide d'un grand récipient bien isolant, on n'a plus de signes de tension, à moins qu'on ne fasse communi-

[1] On se sert pour cela d'une tige de platine ou de laiton doré, tenue par un manche isolant.

Digitized by Google

quer par la main ou par un corps conducteur quelconque, l'eau du récipient avec le sol. Ce que M. Matteucci a fait avec le cuivre, on peut le faire avec tous les autres métaux, en ayant soin que la lame plongée dans l'eau, le fil qui touche le plateau du condensateur, et ce plateau lui-même, soient du même métal. Mais on n'obtient des signes électriques qu'autant que la lame métallique est susceptible d'être attaquée chimiquement par le liquide dans lequel on la plonge.

Un physicien allemand, M. Karsten, avait déjà fait, avant M. Matteucci, un grand nombre d'expériences qui démontrent l'exactitude des principes que nous avons posés, quoiqu'il les ait interprétés différemment, en y voyant la preuve d'un développement d'électricité dans le contact des corps solides et liquides; mais les faits observés par M. Karsten conduisent à une conclusion précisément contraire. Il opère avec des fils de *zinc*, de *cuivre*, d'*argent* et de *platine*, contournés en hélice à l'une de leurs extrémités, laquelle plonge dans une dissolution acide, alcaline ou saline, et communiquant par l'autre à l'un des plateaux d'un condensateur. Si le fil et le plateau sont en zinc, celui-ci se charge d'électricité négative. Quand deux fils sont plongés en même temps dans le liquide sans se toucher, par exemple un fil de zinc et un fil de cuivre, le fil de zinc mis en contact avec le plateau du condensateur se charge d'électricité négative, et le fil de cuivre de positive, et cela quel que soit le métal dont est fait le condensateur. Il va sans dire que le résultat est le même quand on remplace le fil de cuivre par un fil d'argent ou de platine; mais si l'on met ensemble dans le même liquide, toujours sans qu'ils se touchent, un fil de cuivre et un fil de platine, c'est le cuivre qui donne au condensateur l'électricité négative, et le platine la positive. Tous ces résultats sont parfaitement d'accord avec le principe fondamental que nous avons établi, savoir, que dans l'action chimique d'un liquide sur un métal, le métal se charge d'électricité négative, et le liquide d'électricité positive, électricité qui est prise au liquide par le métal moins oxydable qu'on y plonge. Nous reviendrons dans notre dernier paragraphe sur quelques autres expériences de M. Karsten, qui sembleraient,

au premier abord, favorables à l'opinion que le contact serait aussi, indépendamment de l'action chimique, une source d'électricité par lui-même.

Les signes électriques qu'on obtient dans les expériences que nous venons de rapporter sont, en général, assez faibles; il faut pour leur manifestation un électroscope et un condensateur très-sensibles; ils ne sont pas le moins du monde en rapport, quant à leur intensité, avec la vivacité de l'action chimique qui leur donne naissance, tellement que l'une des plus énergiques parmi ces actions, celle de l'acide sulfurique étendu sur le zinc, ne donne pas une manifestation d'électricité plus forte sensiblement que celle qui résulte de la simple oxydation du zinc par l'eau. Cette anomalie apparente tient à un principe que nous avons rappelé au commencement de ce chapitre, celui de la recomposition immédiate des deux électricités, portées par l'action chimique, l'une dans le métal, l'autre dans le liquide. Le métal et le liquide étant tous deux très-bons conducteurs, ces deux électricités tendent à se réunir directement sur la surface où a eu lieu leur séparation[1], au lieu d'aller l'une se rendre au sol, et l'autre affecter le condensateur. Il n'y en a qu'une très-faible proportion qui échappe à cette neutralisation immédiate, et c'est elle qu'accusent les instruments. Il faut donc avoir bien soin de distinguer dans la production de l'électricité par les actions chimiques, comme nous l'avons fait pour les autres sources, l'électricité perçue de l'électricité produite. Ainsi, par exemple, c'est à la circonstance que la recomposition immédiate est beaucoup moins facile, qu'il faut attribuer ce fait que l'action chimique qui résulte sur le zinc de la simple humidité de la main avec laquelle on le fait communiquer avec le sol, donne souvent des signes électriques plus prononcés que ceux qui résultent de l'action sur ce même métal de l'eau acidulée. Et cependant la quantité totale d'électricité produite est bien moindre dans le premier cas que dans le second.

[1] Nous verrons plus loin que ce n'est pas aux mêmes points de cette surface, où se fait le dégagement de l'électricité, que la recomposition s'opère, tellement que celle-ci a surtout lieu quand la surface n'est pas homogène.

Mais la manière la plus simple de diminuer la proportion des deux électricités qui se recomposent à mesure qu'elles sont dégagées, c'est de faire évaporer le liquide à l'instant où il vient de produire l'action chimique. On fait chauffer fortement une capsule d'un métal oxydable, puis on y verse quelques gouttes d'eau, soit pure, soit légèrement acidulée; l'eau attaque le métal chaud et se vaporise en même temps, en sorte que l'électricité positive est emportée par la vapeur, et ne peut se réunir avec la négative, qui du métal passe à l'électroscope dont il fait diverger fortement les feuilles d'or, sans qu'il soit nécessaire de l'intermédiaire d'un condensateur. Si la quantité de liquide injectée dans la capsule est trop considérable pour être entièrement vaporisée, il n'y a presque aucun effet électrique parce que les deux électricités peuvent se recomposer, la positive n'étant pas emportée par la vapeur.

Les effets électriques qu'on obtient par le moyen que nous venons d'indiquer avaient été déjà observés par Volta et par de Saussure, et ils avaient été attribués par ces illustres physiciens, à la vaporisation même du liquide. Mais il est facile de prouver que cette vaporisation n'est point la cause réelle du phénomène, en se servant d'une capsule de platine bien propre, chauffée jusqu'au rouge, et en y injectant, soit de l'eau, soit un liquide incapable, comme l'eau, d'attaquer le platine et de se décomposer lui-même par l'action de la chaleur. On n'obtient alors aucun signe électrique, ainsi que M. Pouillet l'a observé le premier. Cependant, si la capsule n'est pas évasée, il arrive quelquefois qu'elle se charge d'une électricité négative qui provient, ainsi qu'on l'a remarqué, du frottement contre les parois de platine, des globules d'eau entraînées par la vapeur. Il y a également production d'électricité si l'eau tient un sel en dissolution, ou si le liquide éprouve une altération chimique par son contact avec le platine chaud. Cet effet, comme nous le verrons dans le paragraphe suivant, est dans quelques cas un effet simplement mécanique, et dans le plus grand nombre, un effet vraiment chimique, provenant de la décomposition de la dissolution.

M. Matteucci a réussi à rendre sensible sous la même forme

l'électricité due à l'oxydation, sans avoir besoin de chauffer préalablement le métal. Il place au fond de la capsule de platine un petit morceau de potassium, qu'il écrase pour l'étendre et le faire adhérer à la surface du platine; puis après avoir mis la capsule en communication avec le condensateur, il fait tomber une goutte d'eau sur le potassium; celle-ci est décomposée avec inflammation de l'hydrogène; dès que la flamme de l'hydrogène a cessé, on enlève le plateau du condensateur, et on trouve que la capsule lui a communiqué l'électricité négative, tandis que l'hydrogène et la vapeur d'eau formée par sa combustion ont emporté la positive.

Quelques physiciens ayant attribué les signes électriques, même dans le cas où la capsule est oxydable, au frottement contre les parois, des gouttelettes liquides entraînées mécaniquement par la vapeur, M. Buff a disposé l'expérience de façon à démontrer catégoriquement que l'effet provient bien de l'action du liquide sur le métal. Dans ce but, il a renfermé le liquide dans une cornue de verre, chauffée par une lampe à alcool, pour éviter ainsi toute influence de l'électricité de la flamme. Un fil de métal, enveloppé d'un tube de verre, qui le préserve du contact de la vapeur, plonge par une extrémité dans le liquide, et par l'autre communique avec un des plateaux d'un électroscope condensateur. A l'ouverture de la cornue est placée une lame de platine bien isolée, que les vapeurs doivent rencontrer en se dégageant, et qui communique avec le second plateau du condensateur ou avec le sol, ce plateau dans ce cas communiquant aussi avec le sol. L'échauffement du liquide et l'évaporation lente qui en résulte sont accompagnés d'une charge très-sensible du condensateur; mais cette charge n'a pas lieu si, tout en laissant la lame de platine, on retire le fil qui plonge dans le liquide, preuve que la simple évaporation d'un liquide ne produit pas d'électricité. Du reste, la force de la charge dépend à la fois de la nature du liquide et de celle du fil qui y plonge. Les plateaux du condensateur étant en cuivre doré, et le liquide de l'eau de source ordinaire, on obtient une charge négative en plongeant dans l'eau un fil de zinc. En remplaçant successivement le zinc par le cuivre et l'argent,

on a encore des signes négatifs, mais d'une intensité de plus en plus faible.

Les expériences de Buff sont assez analogues à celles de Karsten, avec cette différence que les signes électriques sont beaucoup plus prononcés à cause de l'évaporation du liquide, qui en emportant l'électricité positive, diminue la proportion des deux électricités qui se recombinent d'une manière immédiate. Nous reviendrons également sur quelques-unes des expériences de Buff qui, comme celles de Karsten, sembleraient, quand on ne les examine pas de près, favorables à la théorie du contact.

Il résulte de ce qui précède qu'il est très-difficile d'obtenir par l'action chimique des manifestations d'électricité statique d'une intensité un peu prononcée. Il n'en est pas de même pour les manifestations qui ont lieu sous la forme dynamique ou de courant, l'action chimique étant de toutes les sources celle qui les produit avec le plus d'énergie, parce qu'on peut éviter en grande partie l'influence de la recomposition immédiate. En effet, on plonge dans un vase rempli d'eau acidulée une lame d'un métal oxydable, tel que du zinc, par exemple, puis on l'unit hors du liquide, par un fil de métal qui lui est soudé, à une lame de platine plongée dans le même liquide. Alors l'électricité positive que prend le liquide par l'effet de l'action chimique peut s'unir à la négative que le métal attaqué a gardée, en traversant la lame de platine et le fil qui unit cette lame au métal (fig. 301). Une grande proportion des deux électricités se neutralise de cette manière, au lieu de le faire immédiatement à la surface de contact du liquide et du métal attaqué, et elle donne naissance ainsi à un courant électrique qui est accusé par son action sur une aiguille aimantée placée dans le voisinage du fil conducteur, au moyen duquel les deux métaux sont unis; fil qui peut être celui d'un galvanomètre.

Fig. 301.

Cette association de deux métaux, ou de deux corps solides conducteurs, communiquant ensemble métalliquement, et pla-

cés dans un liquide également conducteur qui attaque l'un d'eux exclusivement, ou du moins plus que l'autre, se nomme *couple voltaïque*[1]. Il n'est pas nécessaire que l'action chimique soit absolument nulle sur l'un des métaux; il suffit pour qu'il y ait courant électrique que l'action soit plus forte sur l'un que sur l'autre. On peut alors envisager les deux métaux comme donnant séparément naissance à deux courants électriques, dont l'un, celui provenant du métal le plus attaqué, est plus intense, et l'autre, celui provenant du métal le moins attaqué, est plus faible, chacun des deux métaux servant de conducteur au courant de l'autre. Le courant perçu est alors la différence entre les deux courants partiels inégaux; il serait tout à fait nul si ces deux courants partiels étaient absolument égaux, condition presque impossible à réaliser, même en employant deux métaux aussi semblables que possible quant à leur nature et à l'étendue de leur surface. La figure 302 représente le cas de ces deux courants partiels dirigés en sens contraire; la plus grande flèche indique la direction du courant définitif, résultant de la différence des deux courants partiels. On voit que c'est le métal le plus attaqué, le zinc, par exemple, qui détermine la direction du courant définitif, courant qui part de ce métal pour se diriger à travers le liquide au métal moins attaqué (le cuivre), et de ce métal au premier, à travers le conducteur qui les unit extérieurement.

Fig. 302.

Nous continuerons à appeler *positif*, comme on le fait dans la théorie du contact, celui des métaux du couple qui, étant le plus attaqué, détermine la direction du courant, et *négatif* le métal moins ou pas attaqué qui ne fait que servir

[1] Dans la pile les deux métaux du même couple plongent bien dans le même liquide, mais ne sont pas unis métalliquement ensemble, l'un d'eux est uni au métal du couple suivant, et l'autre au métal du couple précédent; dans la théorie de Volta on appelle couple la réunion des deux métaux unis ensemble métalliquement, lors même qu'ils plongent dans deux compartiments liquides différents.

de conducteur au courant définitif. Il faut seulement ne pas perdre de vue que l'électricité positive, au lieu de sortir par le métal positif, soit plus attaqué, sort par l'autre, après avoir traversé le liquide, et que c'est par conséquent la négative qui sort du métal le plus attaqué. Le mot positif indiquera seulement pour nous que le métal ainsi dénommé est celui qui détermine le sens du courant[1].

Avant de nous occuper des circonstances qui influent sur l'intensité de l'électricité dégagée dans un couple voltaïque et des moyens de l'augmenter, il est nécessaire de prouver que l'action chimique qui accompagne la production du courant auquel il donne naissance, en est bien la cause.

J'avais déjà démontré, en 1828, en me servant d'un galvanomètre très-délicat, qu'un couple formé de deux lames, l'une d'or, l'autre de platine, ne développe aucun courant quand il est plongé dans l'acide nitrique parfaitement pur, mais qu'il suffit de verser une goutte d'acide hydrochlorique dans l'acide nitrique pour obtenir un courant très-prononcé, dirigé de l'or au platine à travers le liquide. Il n'y a d'autre différence entre les deux cas, sinon que dans le premier il n'y a pas d'action chimique ni sur l'un ni sur l'autre des deux métaux, tandis que dans le second, l'or est attaqué et que le platine ne l'est pas ou l'est moins. Pour que cette expérience réussisse bien, il faut employer de l'or et du platine préparés avec beaucoup de soin afin qu'ils soient dégagés de tout alliage, et avoir soin que leur surface soit bien propre. M. Becquerel avait déjà

[1] Nous avons trouvé plus commode de ne pas changer la dénomination employée dès l'origine, lors même qu'il est prouvé maintenant que c'est du métal appelé positif que part extérieurement au couple l'électricité négative, et du métal appelé négatif que part de même la positive. Mais ce n'est point une contradiction, vu que dans la théorie chimique, le point de départ des deux électricités est à la surface de contact du métal attaqué et du liquide excitant, et qu'on peut considérer l'électricité positive comme partant du métal attaqué pour se rendre dans le liquide, etc. D'ailleurs nous entendons les mots *positif* et *négatif* dans un sens indépendant de l'électricité, c'est-à-dire dans le sens absolu de la supériorité du corps positif sur le négatif quant à leur puissance électromotrice.

obtenu le même résultat que moi, en fixant aux extrémités du galvanomètre deux fils d'or plongés dans l'acide nitrique; il n'obtenait ainsi aucun effet, mais en ajoutant une très-petite quantité d'acide hydrochlorique près de la partie immergée de l'un des deux fils, l'aiguille aimantée accusait aussitôt par sa déviation la production d'un courant dirigé à travers le liquide du bout attaqué à celui qui ne l'était pas.

A ce fait fondamental, j'en avais ajouté quelques autres, savoir qu'un couple de *platine* et *palladium* inactif dans l'acide sulfurique étendu devient actif dès qu'on verse dans la solution acide quelques gouttes d'acide nitrique qui déterminent une action chimique sur le palladium; il en est de même d'un couple *rhodium* et *platine*, dont l'action est nulle dans l'acide nitrique pur, et qui donne un courant dans l'eau régale qui attaque le platine.

Ce n'est pas tout; après avoir montré qu'il n'y a pas de courant, quand dans un couple il n'y a d'action chimique de la part du liquide, ni sur l'un ni sur l'autre des deux métaux du couple, j'avais fait voir que le sens du courant change dans un même couple, quand on substitue au liquide qui attaque plus le premier des deux métaux que le second, un liquide qui attaque plus le second que le premier. Parmi les exemples nombreux de ces inversions que j'avais trouvés, je citerai celui où les deux liquides employés sont aussi peu différents que possible l'un de l'autre, puisque l'un est de l'acide nitrique concentré, et l'autre de l'acide nitrique étendu. Le tableau qui suit se compose de deux colonnes dans lesquelles sont inscrits les uns au-dessous des autres les mêmes métaux, dans un ordre tel que chaque métal détermine le sens du courant quand il forme un couple avec chacun de ceux qui le précèdent, ou est positif par rapport à eux. Les métaux de la première colonne sont plongés dans l'acide nitrique concentré, ceux de la seconde dans l'acide nitrique étendu. Or l'ordre des métaux n'est point semblable dans les deux colonnes, parce que l'action chimique de l'acide nitrique concentré sur les divers métaux n'est point la même que celle de l'acide étendu; mais dans chacune c'est toujours le métal le plus attaqué qui détermine le sens du courant.

Acide nitrique concentré.	Acide nitrique étendu.
Fer oxydé.	Argent.
Argent.	Cuivre.
Mercure.	Fer oxydé.
Plomb.	Fer.
Cuivre.	Plomb.
Fer.	Mercure.
Zinc.	Étain.
Étain.	Zinc.

Si le dégagement de l'électricité était dû au contact des deux métaux, la direction du courant serait indépendante de la nature du liquide interposé entre eux, et par conséquent l'ordre des métaux serait le même dans les deux colonnes. Il y aurait dû également avoir production d'un courant dans les cas que nous avons cités plus haut, où cependant il n'y en avait pas, tant qu'aucune action chimique n'était apparente.

Faraday, qui a fait une série très-nombreuse d'expériences sur ce sujet, a généralisé le résultat auquel j'étais parvenu, en montrant que pour exciter un courant dans un couple, il faut que le liquide soit un électrolyte, et que de plus cet électrolyte exerce une action chimique sur l'un ou sur l'autre des deux métaux du couple, le sens du courant dépendant toujours de celui des deux métaux qui est le plus attaqué. Pour prévenir l'objection que l'absence du courant pourrait provenir de l'imparfaite conductibilité du liquide électrolytique employé, il n'a fait usage que de liquides capables de conduire le courant d'un couple thermo-électrique bismuth et antimoine, savoir : du *sulfure de potassium*, de l'*acide nitreux*, de l'*acide nitrique pur*, de l'*acide sulfurique concentré* et une *solution concentrée de potasse*, ces trois derniers liquides conduisant moins bien que les deux premiers. Il opère en plaçant le liquide électrolytique dans deux verres, communiquant chacun au moyen d'une lame

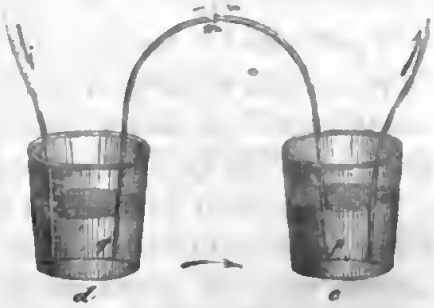


Fig. 303.

de platine avec les extrémités du galvanomètre; puis il réunit les deux verres par un arc *p q*, formé des deux métaux du couple qu'il veut éprouver; ces deux métaux étant unis métalliquement en *m* par des fils de même nature que chacun d'eux (fig. 303).

Avec le sulfure de potassium le courant a été nul en y plongeant successivement des couples fer et platine, fer et or, fer et palladium, nickel et or, nickel et palladium, platine et or, platine et palladium; ce qui tient à ce qu'aucune action chimique n'avait lieu dans ces diverses combinaisons. Il suffit cependant de chauffer le point de contact *m* des deux métaux du couple qui forment l'arc pour obtenir un courant thermo-électrique, qui fait dévier l'aiguille du galvanomètre de 50 à 60°.

Dans ces expériences, il arrive quelquefois qu'il y a production d'un léger courant au moment de l'immersion des lames du couple dans les vases remplis du liquide; avec le couple platine et fer le courant part du platine; mais Faraday s'est assuré que cet effet tient à ce que le fer est quelquefois légèrement oxydé; il suffit également de retirer l'une des lames du liquide et de l'exposer à l'air un moment, pour obtenir un courant qui ne dure que quelques instants, quand on la replonge. Ces diverses causes de perturbation sont sensibles à cause de l'excellent pouvoir conducteur du liquide employé et de la sensibilité des appareils; mais elles disparaissent si on a soin de ne point déranger les lames du couple une fois qu'elles sont plongées dans la solution, et le tout acquiert alors un état naturel et parfaitement régulier. M. Ohm, qui a soumis à un examen tout particulier le cas du couple fer et platine dans le sulfure de potassium, attribue la nullité d'effet à la formation presque instantanée d'une mince couche de sulfure de fer sur la surface de ce métal dès qu'il est immergé.

L'acide nitreux hydraté, le mélange d'acide nitrique et nitreux, une solution concentrée de potasse, sont également inactifs avec un grand nombre de couples. L'argent et le platine, qui donnent un fort courant avec la solution la plus légèrement acide, n'en donnent aucun avec la solution de po-

tasse; il suffit cependant de chauffer légèrement leur point de contact pour avoir un courant très-prononcé dû à la thermo-électricité.

Il est inutile maintenant de remarquer que lorsqu'avec ces mêmes liquides, on se sert de couples qui donnent naissance à un courant, on peut toujours constater l'existence de l'action chimique sur l'un des métaux du couple. Mais quand le liquide est du sulfure de potassium, il y a production d'un sulfure qui forme sur le métal attaqué tantôt une couche non conductrice, comme sur le cadmium et l'étain, par conséquent imperméable au courant; tantôt, au contraire, une couche conductrice, mais non soluble, ce qui arrête également le courant puisque l'action chimique cesse, comme avec le plomb et le bismuth; tantôt une couche non conductrice, mais soluble, comme avec le zinc, ce qui permet au courant de continuer à exister.

Un phénomène assez curieux, observé encore par Faraday, est l'inversion qui a lieu dans le sens du courant du couple cuivre et argent plongé dans la solution du sulfure. Le cuivre est d'abord celui d'où part le courant, et l'argent n'est point terni; puis l'action cesse, et c'est l'argent qui donne naissance au courant et qui se couvre de sulfure, tandis que la couche qui avait été formée sur le cuivre se dissout; peu d'instants après, le cuivre redevient positif, et ainsi le sens du courant et l'action chimique changent simultanément plusieurs fois de suite. Du reste, Faraday a trouvé un grand nombre d'exemples d'inversion dans le sens du courant que produit le même couple, suivant le liquide dans lequel on le plonge, de sorte qu'il a complétement confirmé le principe que j'avais établi, savoir, que la série voltaïque des métaux n'est point absolue, mais qu'elle dépend de la nature du liquide employé comme excitant. Voici un tableau qui renferme les résultats d'expériences faites avec sept liquides et dix métaux différents, et qui est composé de sept colonnes dans chacune desquelles les métaux sont rangés suivant un ordre variable avec le liquide employé. Chaque métal est affecté d'un numéro qui indique l'ordre dans lequel il doit être placé si le liquide employé est un acide étendu, le sens du courant étant toujours tel que le métal qui

suit est celui qui détermine le sens du courant quand il forme un couple avec l'un de ceux qui précèdent.

Acide nitrique étendu.	Acide sulfurique étendu	Acide hydrochlorique.	Acide nitrique concentré.	Dissolution de potasse caustique.	Hydrosulfure de potasse incolore.	Hydrosulfure de potasse jaune.
1 argent.	1 argent.	3 antimoine.	5 nickel.	1 argent.	6 fer.	6 fer.
2 cuivre.	2 cuivre.	1 argent.	1 argent.	5 nickel.	5 nickel.	5 nickel.
3 antimoine.	3 antimoine.	5 nickel.	3 antimoine.	2 cuivre.	4 bismuth.	4 bismuth.
4 bismuth.	4 bismuth.	4 bismuth.	2 cuivre.	6 fer.	8 plomb.	3 antimoine.
5 nickel.	5 nickel.	2 cuivre.	4 bismuth.	4 bismuth.	1 argent.	8 plomb.
6 fer.	6 fer.	6 fer.	6 fer.	8 plomb.	3 antimoine.	1 argent.
7 etain.	8 plomb.	8 plomb.	7 etain.	3 antimoine.	7 etain.	7 etain.
8 plomb.	7 étain.	7 étain.	8 plomb.	9 cadmium.	2 cuivre.	9 cadmium.
9 cadmium.	9 antimoine.	9 cadmium.	10 zinc.	7 etain.	10 zinc.	2 cuivre.
10 zinc.	10 zinc.	10 zinc.	9 cadmium.	10 zinc.	9 cadmium.	10 zinc.

M. Faraday a encore fait un très-grand nombre d'expériences en provoquant une action chimique, et par conséquent un courant électrique, au moyen de la chaleur appliquée à l'un des métaux d'un couple ; il a plus particulièrement examiné le cas où le couple étant formé de deux mêmes métaux, on chauffe l'un des deux et non pas l'autre, au moment de le plonger dans le liquide. Il est clair qu'il en résulte une différence dans l'action chimique du liquide sur les deux métaux ; mais ce sont des effets complexes, parce que le liquide éprouve souvent lui-même une altération chimique par l'action de la chaleur, et qu'il faut avoir égard aux courants thermo-électriques qui ont également lieu quelquefois dans ce cas ; nous ne nous y arrêtons donc pas actuellement, devant revenir sur ce sujet plus loin.

Mais un point essentiel, établi par M. Faraday, sur lequel nous

Fig. 304.

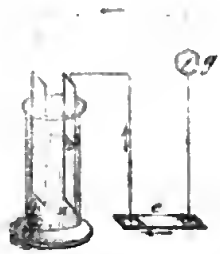


Fig. 305.

devons insister, c'est la possibilité d'obtenir un courant capable d'opérer même une décomposition chimique, avec un seul métal

soumis à une action chimique, sans l'intervention, par conséquent, d'un contact métallique entre deux métaux hétérogènes. Pour obtenir ce résultat, on plonge dans de l'eau acidulée une lame de platine *b* (fig. 304) et une lame de zinc *ac* recourbée horizontalement dans la partie extérieure au liquide; un morceau de papier de tournesol, humecté d'une solution d'iodure de potassium, est placé sur la lame de zinc en *x*, et le bout d'un fil de platine *s* soudé à la lame du même métal est mis également en contact avec ce papier. L'iodure est aussitôt décomposé, ce qui montre que le courant qui produit cette décomposition ne résulte que de l'action chimique sur le zinc, car il n'y a pas de contact métallique entre le zinc et le platine. Une solution de potasse substituée à la solution acide produit le même effet. Si l'on introduit dans le circuit le fil d'un multiplicateur *g* (fig. 305[1]) l'aiguille est déviée immédiatement, aussi bien dans le premier cas que dans le second. M. Faraday a obtenu un très-grand nombre de résultats semblables en soumettant plusieurs électrolytes à l'action décomposante du courant produit par divers métaux plongés dans différents liquides où plongeait également une lame de platine destinée à unir le liquide excitant avec le liquide à décomposer, comme dans l'expérience que nous venons de rapporter, sans qu'il y eût contact entre les deux métaux. Voici un tableau de ces résultats, dans lesquels sont inscrites dans la même ligne horizontale les quatre substances comprises dans les circuits, savoir : 1° le métal attaqué; 2° le liquide excitant; 3° le métal non attaqué, ou moins attaqué, qui sert de conducteur; 4° le liquide électrolytique, qui est décomposé.

Fer	Acide nitrique étendu	Platine	Sulfure de potassium	Cour. prononcé
Id.	*Id.*	*Id.*	Acide nitrique rouge	*Id.*
Id.	*Id.*	*Id.*	Acide nitriq. pâle fort	Passable
Id.	*Id.*	*Id.*	Acide nitreux vert	Très-énergique

[1] Dans la fig. 305 un fil de platine est soudé au zinc *z*, et ce fil est uni avec celui qui part du platine au moyen du papier *c* humecté de la solution électrolytique. C'est cet appareil qui a servi aux expériences dont le résultat est renfermé dans le tableau qui suit.

Fer	Acide nitrique étendu	Platine	Iodure de potassium	Cour. prononcé
Id.	Acide sulfuriq. étendu	*Id.*	Sulfure de potassium	*Id.*
Id.	*Id.*	*Id.*	Acide nitrique ronge	Passable
Id.	Acide muriatique	*Id.*	Acide nitreux vert	Très-énergique
Id.	Acide muriatiq. étendu	*Id.*	Acide nitrique ronge	Passable
Id.	*Id.*	*Id.*	Sulfure de potassium	*Id.*
Id.	Dissolution de sel	*Id.*	Acide nitreux vert	Très-énergique
Id.	Eau ordinaire	*Id.*	*Id.*	Passable
Zinc	Acide nitrique étendu	*Id.*	Iodure de potassium	*Id.*
Id.	Acide muriatique	*Id.*	*Id.*	*Id.*
Cadmium	Acide nitrique étendu	*Id.*	*Id.*	*Id.*
Id.	Acide muriatique	*Id.*	*Id.*	*Id.*
Plomb	Acide nitrique étendu	*Id.*	*Id.*	*Id.*
Id.	Acide muriatique	*Id.*	*Id.*	*Id.*
Cuivre	Acide nitrique étendu	*Id.*	*Id.*	
Id.	Acide muriatique	*Id.*	*Id.*	
Plomb	Acide sulfurique fort	Fer	Acide sulfuriq. étendu	Fort
Étain	*Id.*	*Id.*	*Id.*	*Id.*
Cuivre	Sulfure de potassium	*Id.*	Acide nitrique étendu	Énergique
Id.	*Id.*	*Id.*	Iodure de potassium	*Id.*
Id.	Acide nitrique fort	Fer	Acide nitrique étendu	Très-énergique
Id.	*Id.*	*Id.*	Iodure de potassium	
Argent	*Id.*	*Id.*	Acide nitrique étendu	Fort
Id.	*Id.*	*Id.*	Iodure de potassium	Passable
Id.	Sulfure de potassium	*Id.*	Acide nitrique étendu	Fort
Étain	Acide sulfurique fort	Cuivre	Acide sulfuriq. étendu	*Id.*

Déjà plusieurs physiciens, et notamment Davy, avaient montré qu'on pouvait former des batteries voltaïques avec un seul métal et deux liquides ; mais ils n'avaient jamais construit un seul couple, et surtout la nature de ces phénomènes n'avait point été éclaircie.

Dans le tableau que nous avons transcrit plus haut, on peut remarquer que le liquide excitant varie avec le liquide électrolytique à décomposer. En effet, pour que la décomposition ait lieu, il faut que l'action du premier liquide sur le zinc soit plus forte que celle du second, afin que le courant qui en résulte puisse l'emporter sur les affinités du liquide électrolytique, et les modifier. Ainsi on ne peut décomposer l'eau acidulée avec de l'acide sulfurique, au moyen d'un couple zinc et platine plongé dans une eau acidulée semblable, tandis qu'on

décompose une solution d'iodure de potassium et de chlorure d'argent fondu.

Une dissolution de soude, d'acide hydrochlorique, de nitrate d'argent, de l'iodure et du chlorure de plomb fondus, résistent à cette force décomposante; mais ils sont décomposés si on ajoute à l'acide sulfurique étendu qui sert de liquide excitant, un peu d'acide nitrique qui augmente la puissance chimique de ce liquide sur le zinc.

Nous avons déjà remarqué, à l'occasion de l'électricité dégagée sous forme de tension, qu'il n'y avait pas de rapport entre la vivacité de l'action chimique et l'intensité des signes électriques auxquels elle donne naissance. La même observation est applicable à l'électricité produite sous forme de courant; c'est plutôt la nature de l'action chimique que sa vivacité, qui influe sur l'intensité de la manifestation électrique. Il ne résulte pas de là que la quantité d'électricité dégagée ne soit pas en rapport avec la quantité d'action chimique qui a lieu; nous verrons au contraire, plus loin, que ces deux quantités sont exactement proportionnelles l'une à l'autre; mais la faculté que cette électricité possède de surmonter une certaine résistance, ou ce que Faraday a appelé son *intensité*, qualité qu'il ne faut pas confondre avec la *quantité*, varie avec la nature de l'action chimique qui a lieu sur le métal attaquable du couple. Remarquons encore que la proportion plus ou moins grande des deux électricités qui se recomposent immédiatement sur la surface du métal attaqué, doit nécessairement être inverse de celle qui est transmise à travers le circuit, et par conséquent varier pour un couple donné avec la résistance de ce circuit. Toutefois, cette neutralisation immédiate des deux principes électriques, que M. Faraday a appelée *action locale*, tient à une autre cause que nous devons chercher à analyser.

J'avais déjà remarqué en 1830 que du zinc distillé parfaitement pur, plongé dans de l'acide sulfurique étendu, est à peine attaqué, surtout dans les premiers moments de son immersion, et ne donne naissance, même lorsque l'action a duré un temps assez long, qu'à un petit nombre de bulles d'hydrogène, tandis que le zinc ordinaire du commerce, placé dans les mêmes cir-

constances, produit une énorme quantité d'hydrogène qui se dégage avec effervescence. Toutefois, uni voltaïquement à du platine, le premier zinc donne à surface égale un courant plus fort, et par conséquent dégage plus d'hydrogène que le second. La cause de cette différence tient à ce que le zinc du commerce renferme toujours une petite proportion de cadmium et surtout de fer, ainsi que le prouve l'analyse chimique. Il suffit, en effet, de mélanger directement un dixième, et même moins, de fer en poudre très-fine au zinc distillé, pour le rendre capable de dégager autant et même plus d'hydrogène que le zinc du commerce, quand on le plonge dans l'eau acidulée. Le phénomène est donc évidemment électro-chimique, et ce qui le prouve encore, c'est que la dissolution d'acide sulfurique qui donne avec le zinc dans lequel il y a du fer, comme avec le zinc du commerce, le dégagement gazeux le plus abondant, est la même que celle qui a le pouvoir conducteur le plus fort pour l'électricité, savoir : la dissolution de la densité 1,259.

Il est donc évident qu'il s'établit sur la surface du zinc qui renferme des particules ou de fer ou d'un métal moins oxydable que le zinc lui-même, des courants provenant des nombreux couples que forment les particules de fer avec les particules de zinc qui les touchent. Ces courants décomposent l'eau qu'ils traversent; le zinc s'oxyde et se dissout à l'état de sulfate, et l'hydrogène se dégage partout où il y a quelques portions de fer en contact avec le liquide. M. Sturgeon, en explorant la surface d'une plaque de zinc plongée dans l'acide sulfurique étendu, y a constaté l'existence de ces pôles négatifs qui changent fréquemment de place pendant la durée de l'action chimique en raison du dépôt d'oxyde, de la texture du métal, etc. Les points qui servent de pôles négatifs n'éprouvant aucune altération, on conçoit pourquoi une lame de zinc devient rugueuse après une longue immersion dans un liquide qui l'attaque. Le fer n'est pas le seul métal dont la présence dans le zinc produise cet effet : le cuivre, le plomb, même l'étain et le cadmium, tous moins oxydables que le zinc, le déterminent également, mais à un moindre degré, surtout ces deux derniers. On peut même en implantant artificiellement, sur la surface

d'un morceau de zinc distillé, une multitude de petites pointes de platine, produire un dégagement gazeux très-considérable, qui a lieu aux extrémités de ces pointes, quand on plonge tous ces petits couples dans la dissolution d'acide sulfurique[1]. On produit le même effet sur le cadmium qui, lorsqu'il est pur et isolé, jouit de la même propriété que le zinc distillé.

On peut donner au zinc ordinaire la propriété du zinc distillé de n'être que peu ou point attaqué quand il est plongé dans l'eau acidulée avec l'acide sulfurique; il suffit pour cela d'amalgamer sa surface, opération facile à faire, car il n'y a qu'à frotter la surface du zinc avec un tampon imprégné d'une dissolution d'acide sulfurique pour la décaper, en étendant le mercure en même temps sur cette surface. Mise en contact avec une lame de zinc ordinaire dans la dissolution acide, la lame de zinc amalgamé forme, comme le zinc distillé, un couple dont elle est aussi l'élément oxydable, quoique, lorsqu'elle est isolée, elle ne soit presque pas attaquée par la dissolution. Mais si on la fait communiquer avec un fil ou une lame de platine, son zinc se dissout rapidement avec un fort dégagement d'hydrogène sur le platine; le même effet a lieu exactement avec le zinc distillé. Il est évident que cette similitude d'effets tient à ce que le lavage avec l'acide sulfurique étendu et l'amalgamation qui le suit, fait disparaître de la surface du zinc du commerce toutes les impuretés qui s'y trouvaient mélangées,

[1] C'est à une cause semblable qu'on peut attribuer l'influence qu'exerce, d'après les observations de M. E. Millon, sur la décomposition de l'eau par le zinc, la présence dans la dissolution acide ou saline dans laquelle le zinc est plongé, de petites quantités d'un sel métallique. Ainsi l'addition d'un peu de bichlorure de platine dans l'acide sulfurique étendu, fait perdre à une lame de zinc 4^{g}, 298 de poids, dans le même temps où une lame semblable dans le même acide pur ne perdait que 0^{g}, 028. Il est évident qu'il s'opère une précipitation d'un peu de platine sur certains points de la surface du zinc, d'où résulte la formation de couples voltaïques. Et en effet, l'intensité de l'effet varie avec la nature de la dissolution métallique, et par conséquent du métal déposé ; ainsi elle est plus forte avec le bichlorure de platine qu'avec le sulfate de cuivre. L'étain et le fer présentent des phénomènes analogues à ceux qu'offre le zinc. Remarquons que, quoique tous les effets observés par M. E. Millon ne puissent pas s'expliquer exactement de la même manière, ils tiennent cependant tous à des causes électro-chimiques.

telles en particulier que les petites molécules de fer. Au fond il s'opère une véritable dissolution de zinc pur dans le mercure, qui recouvre comme d'une couche liquide la surface de la plaque de zinc. Or le zinc pur allié avec le mercure ne peut pas être plus attaqué que le zinc pur isolé, car le mercure dans ce cas ne forme pas avec les molécules de zinc des couples, comme peuvent le faire des particules de fer simplement disséminées dans le métal et non alliées avec lui; le mercure joue ici le rôle d'un simple dissolvant. Seulement, dès que, par son contact avec le platine, le zinc amalgamé forme un couple, l'attraction du mercure par le zinc n'est pas plus puissante que la cohésion qui retient les unes aux autres les particules du zinc simplement distillé, pour empêcher que l'eau acidulée n'oxyde et ne dissolve le métal dans ce cas comme dans l'autre. Faraday, qui a fait un grand nombre d'expériences sur ce sujet, a trouvé que de deux plaques de zinc amalgamées, mises chacune séparément sous une éprouvette remplie d'une dissolution d'acide sulfurique, dont l'une était isolée, tandis que l'autre était en contact avec une lame de platine, dans le même temps la première n'avait presque pas perdu de son poids en ne dégageant que très-peu d'hydrogène, tandis que la seconde avait perdu plusieurs grammes en dégageant une quantité équivalente d'hydrogène sur le platine.

Mais il se présente ici une question bien plus importante : comment se fait-il que le zinc amalgamé ou le zinc distillé, ce qui revient au même, qui ne sont que peu ou point attaqués par l'eau acidulée, le soient si fortement quand ils sont unis, au moyen d'un conducteur, avec un métal peu ou point oxydable plongé dans le même liquide, et donnent naissance alors à un courant bien plus fort que celui que produit dans les mêmes circonstances le zinc du commerce si fortement attaqué ?

Remarquons d'abord que l'action qu'éprouve ce dernier zinc ne peut point contribuer à la formation du courant du couple, puisqu'elle provient uniquement des courants superficiels produits par les couples moléculaires, courants qui ne parcourent point le circuit. Au contraire, ces courants qui consomment inutilement du zinc diminuent d'autant la force du courant prin-

cipal du couple; et c'est pourquoi, à surface égale, une plaque de zinc amalgamé ou distillé donne un courant plus énergique qu'une plaque de zinc du commerce, et est positive par rapport à cette dernière quand elle forme un couple avec elle.

Ce point établi, nous pouvons considérer comme un principe démontré par l'expérience qu'une particule de zinc parfaitement pur, ne présentant aucune trace d'oxydation, est incapable de décomposer l'eau quand elle est placée isolément dans une dissolution d'acide sulfurique[1]. Mais si on la met en contact avec une particule moins oxydable qu'elle et conductrice, telle qu'une particule de platine, de fer, de cuivre, ou même avec une particule de son propre oxyde, l'eau se décompose et un courant électrique est produit. Ce courant est moléculaire dans ce cas; mais son circuit est d'une grandeur finie, quand, au lieu de deux molécules, ce sont deux fils, deux lames en contact et formant un arc, qui sont dans le même liquide. La production du courant est simultanée avec l'action chimique; elle ne lui est ni antérieure ni postérieure; elle ne lui est pas postérieure, puisqu'il n'y a pas d'action chimique sans la formation du couple; elle ne lui est pas antérieure, puisque le courant ne peut s'établir qu'autant que le couple voltaïque est chargé avec un liquide électrolytique susceptible d'attaquer l'un de ses métaux, et non avec un liquide électrolytique quelconque, quelque bon conducteur qu'il soit, ainsi que l'ont prouvé surabondamment les nombreuses expériences que nous avons rapportées plus haut.

C'est à M. Schoenbein, qui a trouvé plusieurs combinaisons voltaïques où l'action chimique ne préexiste pas à l'action voltaïque, que nous devons la première idée de la théorie qui rend compte de ces phénomènes, théorie qui se rapproche beaucoup de la manière dont Faraday les envisage, et qui est d'accord avec celle que nous avons exposée sur la constitution électro-moléculaire des corps.

[1] M. d'Almeida a dernièrement confirmé ce principe, en préparant par la méthode galvano-plastique du zinc aussi pur que possible; la lame se montra inattaquable dans l'acide sulfurique étendu seulement de neuf fois son volume d'eau, et il fallut plusieurs heures pour la dissoudre dans l'acide bouillant.

Nous supposons dans ce qui va suivre qu'il s'agit du zinc et de l'eau; il est clair qu'il en sera de même de tout métal et

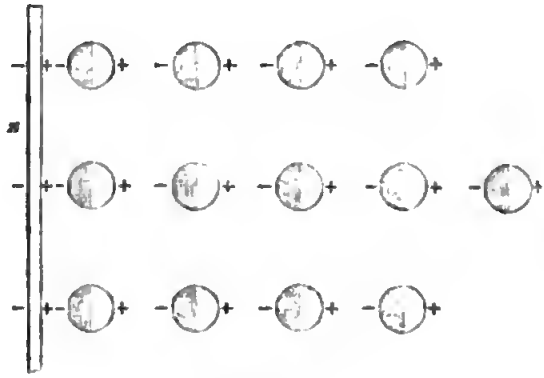


Fig. 306.

de tout liquide électrolytique, dont l'un des éléments est susceptible de se combiner avec ce métal. Quand le zinc *z* est plongé dans l'eau (fig. 306), ses molécules polarisent chacune des molécules d'eau qui les touchent, celles-ci les suivantes, et ainsi de suite, de manière qu'il part de la surface du zinc autant de filets de molécules d'eau polarisées qu'il y a de points à cette surface. Chacune des molécules de ces filets présente son oxygène négatif du côté du zinc, et son hydrogène positif de l'autre côté, tandis que la molécule de zinc a son électricité positive du côté où elle est en contact avec la molécule

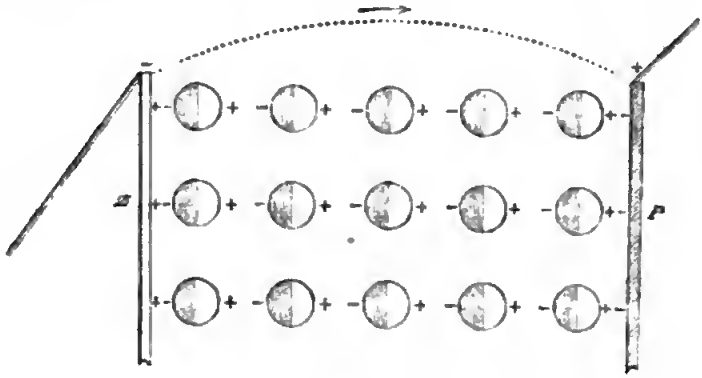


Fig. 307.

d'eau, et sa négative de l'autre. Cet état de polarisation ou de tension ne cesse qu'au moment où, en faisant communiquer le

zinc z et l'eau avec le sol ou avec les plateaux d'un condensateur, ce qui revient au même, on donne un écoulement à l'électricité négative du zinc, ainsi qu'à la positive de celles des particules d'eau qui sont en contact avec le conducteur, lequel peut être la main de l'observateur ou une lame P de platine qui les décharge (fig. 307)[1]. Au même instant, l'oxygène de la particule d'eau en contact avec le zinc se combine avec lui, en donnant lieu à une neutralisation de leurs deux électricités contraires; l'hydrogène de cette première particule d'eau se combine avec l'oxygène de la seconde, et ainsi de suite jusqu'à l'hydrogène de la particule en contact avec le conducteur P, qui se dégage à la surface de ce conducteur. La même théorie s'applique au cas du zinc qui renferme des substances hétérogènes, telles que des particules de fer. On peut voir (fig. 308) les courants locaux qui s'établissent sur la surface du zinc, et qui, partant des molécules de zinc les plus voisines des particules de fer F, viennent y aboutir en y dégageant l'hydrogène.

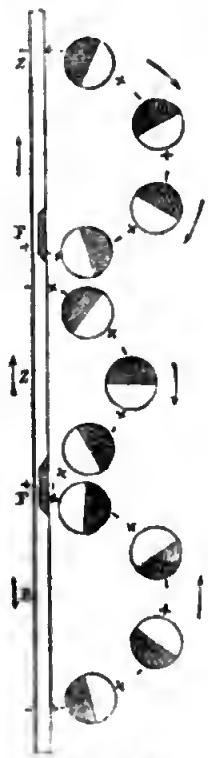


Fig. 308.

Il y a donc quatre phénomènes distincts, mais simultanés, quand on plonge dans un vase rempli d'eau une lame de zinc mise en communication avec le plateau d'un condensateur, et une lame de platine en communication avec l'autre plateau du même condensateur ou avec le sol: 1° charge négative donnée au plateau qui communique avec le zinc; 2° oxydation de la surface du zinc; 3° dégagement de l'hydrogène à la surface du platine; 4° écoulement de l'électricité positive dans le sol ou dans le plateau qui communique avec le platine.

La quantité d'action chimique qui correspond à chaque charge du condensateur est infiniment faible;

[1] La ligne ponctuée *a b* représente un fil métallique qui unit le zinc et le pla-

mais, en opérant un très-grand nombre de décharges successives, on finit par apercevoir l'oxydation du zinc à la perte qu'il éprouve, mais surtout la présence de l'hydrogène à ce que la lame de platine est polarisée. J'ai réussi à constater cette polarisation, en plongeant dans l'eau acidulée deux lames de platine parfaitement semblables, et en m'assurant, au moyen d'un galvanomètre bien sensible, qu'elles ne donnaient naissance à aucun courant; puis j'ai plongé dans le liquide une lame de zinc que j'ai mise en communication avec l'un des plateaux du condensateur, pendant que je faisais communiquer l'une des lames de platine *a* avec l'autre plateau ou avec le sol, en ayant soin que la seconde lame *b* demeurât bien isolée. Après avoir déchargé et rechargé ainsi plusieurs fois de suite le condensateur, j'ai uni respectivement les deux lames de platine avec les deux bouts du galvanomètre, et j'ai obtenu un courant dont le sens indique que la lame de platine *a* a été polarisée positivement, et par conséquent recouverte d'une couche mince d'hydrogène. Si c'est la lame *b* qui communique avec le sol ou avec le second plateau du condensateur, et la lame *a* qui est isolée, c'est la lame *b* qui est polarisée positivement [1].

tine; la seule différence entre ce cas et celui qui nous occupe, c'est qu'on a un courant continu, au lieu d'une suite de décharges; aussi l'oxydation du zinc et la polarisation du platine sont obtenus beaucoup plus promptement.

[1] Cette expérience que j'ai répétée plusieurs fois, toujours avec succès, prouve qu'il ne peut pas y avoir production même d'électricité de tension dans un couple voltaïque, sans qu'il y ait une action chimique correspondante. J'ai réussi, en la faisant sous une forme un peu différente, à rendre compte d'un fait que M. Foucault avait observé et qu'il avait cru à tort être favorable à l'idée que les liquides ont pour l'électricité une conductibilité physique analogue à celle des métaux, indépendamment de leur conductibilité électrolytique. Voici ce fait :

Dans une auge rectangulaire sont disposées verticalement et à égales distances d'un centimètre, onze plaques de cuivre enveloppées de baudruche ou de papier à filtrer; sur les bords de la caisse est posée une traverse en bois portant dix plaques de zinc amalgamées qui viennent s'intercaler parmi les cuivres. Toutes ces plaques, cuivre et zinc, sont séparées et ne communiquent entre elles que par le liquide acidulé que l'on verse dans l'auge, et dont le niveau marqué par une ligne ponctuée s'élève très-peu au-dessus du bord libre des lames de cuivre; les zincs seuls émergent par les prolongements étroits qui les relient à leur support commun; enfin les deux cuivres extrêmes sont mis en communication

Quand le zinc n'est pas pur, les particules de la surface où il y a du fer ou quelque autre substance moins oxydable que le zinc, produisent le même effet que le platine. Les filets d'eau polarisés aboutissent à ces points (fig. 308), et il y a là un dégagement d'hydrogène : ce sont ces courants moléculaires qui constituent l'action locale. Il est probable que c'est ainsi que se passe dans bien des cas l'action chimique d'un liquide sur un métal; car lorsqu'on peut préserver la surface d'un métal

par le fil d'un galvanomètre. Lorsque les zincs occupent les milieux des cellules, le galvanomètre reste au 0°, mais dès qu'on imprime un déplacement à la traverse dans un sens ou dans l'autre, les zincs sont tous à la fois reportés du même côté, et il en résulte un courant qui va des cuivres les plus rapprochés aux zincs dans l'intérieur de l'auge, et par conséquent du cuivre le plus éloigné à celui qui en est le plus rapproché, au dehors de l'auge. Or, il m'a été facile de prouver que cet effet ne tient qu'à ce que les cuivres sont tous polarisés positivement sur celles de leurs faces qui sont tournées du côté du zinc le plus près.

En effet, si je prends deux lames de cuivre, ou mieux encore deux plaques de platine, que je les plonge aux deux extrémités d'une auge en verre bien isolée et remplie d'eau très-légèrement acidulée, en ayant soin que les fils conducteurs qui partent de ces plaques soient tenus par des manches isolants, je n'obtiens aucun courant au galvanomètre en le faisant communiquer avec ces fils conducteurs, quand les plaques ne sont pas polarisées, lors même que je plonge entre elles une lame de zinc tenue également par un manche isolant, soit que je mette la lame exactement entre les deux plaques de platine, soit que je la place tout près de l'une ou de l'autre. Si je fais communiquer la lame de zinc avec le sol ainsi que les deux plaques de platine, je n'ai encore aucun courant sensible, tant que je mets la lame de zinc bien exactement au milieu ; mais si je rapproche le zinc de l'une des plaques de platine, j'en obtiens un dans lequel cette plaque est positive. Il est évident que dans ce cas l'électricité négative du zinc étant déchargée dans le sol, la positive du liquide s'échappe par la plaque de platine la plus rapprochée, en dégageant sur sa surface l'hydrogène qui provient de la décomposition électrolytique de l'eau; cette légère couche d'hydrogène, en polarisant la plaque, la rend positive par rapport à la plaque la plus éloignée qui, à cause de la plus grande étendue du liquide dont le zinc est séparé d'elle, n'a pas pu servir à la décharge. Il faut, pour rendre le phénomène plus sensible, envelopper le zinc de papier à filtrer, afin de pouvoir le rapprocher le plus possible dans le liquide de l'une ou de l'autre plaque de platine, tout en évitant le contact métallique. C'est une chose remarquable de voir qu'il suffit que la lame de zinc ou les deux plaques de platine soient isolées pour qu'il n'y ait plus trace de courant; seulement il faut bien s'assurer, avant chaque expérience, que les plaques de platine ne sont pas polarisées, et par conséquent n'agissent pas sur le galvanomètre quand elles sont seules dans le liquide.

de toute impureté, on n'a pas d'action chimique, sauf avec les corps éminemment oxydables tels que le potassium.

On conçoit que, lorsque le zinc est assez pur, soit parce qu'il est distillé, soit par l'effet de l'amalgamation pour qu'il n'y ait pas d'action locale, le nombre des particules qui, à surface égale, servent à l'action efficace est bien plus grand, ce qui explique la supériorité du zinc pur sur le zinc ordinaire, que nous avons signalée plus haut. Cette différence, très-sensible pour les effets dynamiques, ne l'est que peu ou point pour les effets de tension, qui n'exigent que bien peu d'action chimique; c'est ce qui explique une anomalie apparente observée il y a longtemps par MM. Ampère et Becquerel, mais signalée dernièrement sous une forme différente et plus frappante par M. Matteucci, auquel nous l'empruntons. On plonge une lame de zinc amalgamé de trois centimètres carrés de surface, dans de l'eau légèrement acidulée par l'acide sulfurique, et une lame de platine dans une solution semblable, séparée seulement de la première par un diaphragme poreux. La première lame est en communication avec le condensateur; elle ne donne aucun signe de tension avant que la seconde communique avec le sol; mais dès que cette communication est établie, les feuilles d'or de l'électroscope indiquent une divergence de 10°. En répétant plusieurs fois l'expérience, on obtient la même divergence; alors on plonge dans le compartiment où se trouve la lame de platine un fil également de platine qui est en contact avec la lame de zinc; l'hydrogène se dégage immédiatement sur ce fil, et cependant les signes de tension sont les mêmes qu'auparavant. Or, on n'a pas fait autre chose que ce que ferait une petite action locale, c'est-à-dire qu'on a employé une partie du zinc de la lame à produire le courant qui résulte de l'addition du fil de platine, mais il reste plus de zinc qu'il n'en faut pour subvenir à la tension, et on en aurait la preuve dans le fort courant qui serait produit, nonobstant la présence du fil de platine, si on réunissait métalliquement le zinc à la lame de platine. Le résultat est le même, sauf quant aux signes électriques qui de négatifs deviennent positifs, lorsqu'on fait communiquer avec le condensateur la

lame de platine, et avec le sol la lame de zinc unie toujours au liquide par le fil de platine qui lui est soudé.

Dans la théorie que nous venons d'exposer, nous avons admis que le conducteur associé au zinc était tout à fait inactif, que c'était une lame de platine; les choses se passent de même s'il est attaquable par le liquide, si c'est une lame de cuivre ou de fer par exemple; seulement la polarisation du liquide opérée par le zinc est diminuée en intensité de la force de la polarisation contraire que détermine l'affinité chimique de l'oxygène de l'eau pour le cuivre ou pour le fer. Si les deux polarisations sont parfaitement égales, il est clair que l'une détruit l'autre. Mais il peut arriver que la substance conductrice associée au zinc, au lieu d'avoir de l'affinité pour l'oxygène, en ait pour l'hydrogène de l'eau, alors la force polarisante du zinc sur le filet liquide interposé entre le conducteur et lui, loin d'être diminuée, est au contraire augmentée, et le courant acquiert par là une intensité bien plus grande. C'est ce qui arrive quand on recouvre la lame de platine d'une couche de peroxyde de plomb, substance dont l'affinité pour l'hydrogène de l'eau est très-grande, à cause de sa tendance à se désoxyder. L'électricité négative de la lame de zinc et la positive que prend la lame de platine deviennent bien plus fortes, ainsi que le prouve la charge du condensateur. J'ai réussi même à obtenir par cette combinaison un couple capable de décomposer vivement l'eau acidulée par l'acide sulfurique, dans un voltamètre à fils de platine. Le peroxyde amené à l'état d'une poudre sèche et fine est tassé avec soin dans une auge poreuse en porcelaine dégourdie, telle que celles qui servent aux piles de Grove. Une lame mince de platine est placée au milieu de l'auge, de façon qu'elle soit complétement enveloppée de peroxyde; cette lame porte un appendice auquel est soudé un fil conducteur; on plonge l'auge poreuse remplie de peroxyde et une lame de zinc amalgamé dans une dissolution saline ou acide, puis on fait communiquer respectivement les lames de zinc et de platine avec les deux fils d'un voltamètre; on obtient ainsi jusqu'à dix centimètres cubes de mélange gazeux par minute, tandis qu'avec un couple de Grove semblable, sauf que le peroxyde de plomb est remplacé par

l'acide nitrique, on ne produit qu'une décomposition à peine sensible. Seulement l'effet s'affaiblit au bout de quelques moments par l'infiltration d'un peu de sulfate de zinc dans le peroxyde, et par la désoxydation du peroxyde lui-même. Il s'affaiblit plus vite et est beaucoup moins intense quand on remplace le peroxyde de plomb par le peroxyde de manganèse, ainsi que je m'en suis assuré. On obtient cependant dans ce cas 2 cent. cubes de mélange gazeux par seconde[1].

La tendance des peroxydes de plomb et de manganèse à se désoxyder en s'emparant de l'hydrogène de l'eau est assez forte pour qu'on puisse obtenir, soit à l'état de tension, soit à l'état de courant, des signes électriques très-prononcés en plongeant dans une dissolution acide et même dans l'eau pure, une lame de platine et ces peroxydes, soit en morceau, soit à l'état de poudre étendue sur une feuille de platine; c'est ce que Schoenbein a remarqué le premier. Ici la polarité est déterminée par l'élément négatif du couple; la lame de platine donne au condensateur de l'électricité négative, tandis que le peroxyde lui communique de l'électricité positive; et le courant marche dans un conducteur qui réunit extérieurement au liquide ces deux substances, du peroxyde au platine; mais ce courant ne peut être accusé que par son action sur le galvanomètre; il ne peut traverser un voltamètre à eau acidulée étant incapable de décomposer l'eau. Les dissolutions acides, et surtout celles d'acide chlorhydrique, rendent le courant beaucoup plus énergique en facilitant la désoxydation; M. Matteucci, en plongeant dans de l'acide chlorhydrique un fil de platine recouvert de peroxyde de plomb et un fil d'or formant un couple, a obtenu un courant très-fort et la formation d'un chlorure d'or; il n'y avait pas d'effet quand le platine n'était pas recouvert du peroxyde. Si l'on remplace les peroxydes par un morceau de chromate de potasse, on obtient un courant d'une intensité très-remarquable, surtout en employant comme

[1] La surface de la lame de platine était de 100 centimètres carrés environ; celle du zinc était double, la plaque de ce dernier métal étant recourbée pour entourer l'auge poreuse comme dans la pile de Grove.

liquide interposé entre le chromate et le platine, de l'acide chlorhydrique ou de l'acide nitrique; on sait qu'il y a une désoxydation du chromate de potasse. M. Poggendorff a également observé qu'une lame de cuivre dont la surface est oxydée facilite comme le peroxyde de plomb la production du courant, quand elle forme un couple avec le zinc dans l'acide sulfurique étendu.

M. Becquerel avait déjà avant moi obtenu des courants électriques avec un couple platine et peroxyde de manganèse ; mais il ne s'était servi que d'eau pure et n'avait pas employé d'autres peroxydes; il avait trouvé que l'effet se manifeste sous forme d'une espèce de décharge qui a besoin, pour se renouveler, que le circuit soit interrompu quelques instants, et qui est d'autant plus intense que cette interruption a duré plus longtemps. Ce résultat tient probablement à l'imparfaite conductibilité électrique du liquide employé et à la faible action chimique qu'il exerce. M. Becquerel avait également produit des effets de tension au condensateur en le touchant avec une lame de platine sur laquelle était placé du peroxyde de manganèse, tenu entre les doigts; nous verrons que cela tient à la même cause.

M. Munck, en comparant sous ce rapport diverses substances négatives, avait obtenu les résultats suivants, qui montrent la supériorité des peroxydes, en faisant communiquer avec le condensateur de cuivre, au moyen d'un papier humecté, les diverses substances dont les noms suivent, et qu'il touchait avec une lame de zinc tenue entre ses doigts :

Zinc mis en contact avec :	Degrés de tension négative.
Cuivre.	4°
Argent.	4° ½
Charbon.	4° ⅔
Or.	5°
Sulfure noir de mercure. . . .	5° ½
Pyrite.	6°
Peroxyde de manganèse. . . .	6° ½
Peroxyde de plomb.	9° ½

Comme nous le verrons plus loin, l'humidité de la main joue sur le zinc le rôle de l'eau et tend, par conséquent, à lui

donner l'électricité négative, tandis que la positive va dans le sol par corps de l'observateur; le cuivre, l'argent, le charbon et l'or ne jouent que le rôle de conducteurs, tandis que l'action du papier humide sur les dernières substances du tableau ajoute son effet à celui de l'oxydation du zinc, puisque cette action tend à donner au papier, et par conséquent au condensateur, de l'électricité négative. Du reste, nous reviendrons sur ces phénomènes un peu complexes, quand nous examinerons la question du développement de l'électricité par le contact.

Il résulte de ce qui précède que la production de l'électricité dans un couple voltaïque n'est qu'une manifestation, se faisant sous une forme différente, de l'électricité qui accompagne toujours une action chimique. Seulement sous cette forme l'électricité devient perceptible directement, tandis que dans la forme ordinaire que nous avons désignée sous le nom d'action locale, elle ne l'est qu'indirectement. L'affinité chimique ne peut donc s'exercer sans qu'il y ait en même temps production d'électricité, tantôt perceptible, tantôt non perceptible. Il y a plus : la formation d'un couple qui facilite la perception de l'électricité favorise, dans beaucoup de cas, l'exercice de l'affinité chimique, particulièrement dans les cas où l'homogénéité de la substance solide exposée à l'action chimique d'un liquide ne permet pas l'établissement de courants moléculaires superficiels. C'est en tirant parti de la puissance nouvelle qu'acquiert ainsi l'affinité chimique et qu'il a le premier signalée, que M. Becquerel a réussi à produire un grand nombre de composés inconnus jusqu'alors, et à obtenir à l'état cristallin plusieurs substances qu'on n'avait jamais réussi avant lui à faire cristalliser. Cet ordre de faits, qui est une des plus élégantes applications de l'électricité à la chimie, trouvera sa place dans la sixième partie de ce traité, consacrée aux applications.

Remarquons encore, avant de quitter ce sujet, que les précipitations métalliques, telles que celles qu'on obtient dans l'étamage des épingles, ou en plongeant une lame de fer dans une dissolution de sulfate de cuivre, ne sont, comme le dégagement de l'hydrogène par l'action de l'acide sulfurique étendu sur le zinc du commerce, qu'un effet électro-chimique dû à des cou-

Digitized by Google

rants moléculaires qui constituent ce que nous avons appelé l'action locale. Une lame de fer plongée dans le sulfate de cuivre présente presque toujours sur sa surface un ou deux points légèrement oxydés là où il y a quelques gerçures, peut-être quelques particules de charbon; aussitôt ce défaut d'homogénéité détermine un premier petit courant qui décompose le sulfate, un peu de cuivre est immédiatement déposé, et alors l'action n'en devient que plus facile, jusqu'à ce que la presque totalité de la surface du fer soit recouverte de cuivre. On a remarqué en effet que si cette surface est parfaitement homogène, ce qui est difficile à obtenir, la précipitation du cuivre n'a plus lieu. Les travaux importants de Bucholz et de Grotthus et ceux plus récents de Fischer de Breslau sur ce sujet, et en particulier sur les végétations métalliques, confirment complétement l'origine électro-chimique de cet ordre de faits, dont les détails rentrent dans les phénomènes purement chimiques, puisqu'il ne s'agit plus que de l'exercice de l'affinité. Toutefois nous serons appelé à y revenir quand nous nous occuperons des applications de l'électricité à la chimie.

C'est aussi à une cause électro-chimique semblable qu'on doit attribuer le fait important observé pour la première fois par Davy, qu'on peut protéger un métal, le cuivre, par exemple, contre la corrosion exercée sur lui par une dissolution acide ou saline, telle que l'eau de mer, en l'associant voltaïquement à un métal plus oxydable tel que le zinc. Il se produit entre le zinc soudé ou appliqué au cuivre et le cuivre lui-même, un courant qui décompose l'eau et en dépose l'hydrogène contre la surface du cuivre, hydrogène qui prévient l'oxydation ou la détruit à mesure qu'elle a lieu. Dans ce dernier cas, qui se présente assez souvent, le cuivre finit par se couvrir d'une couche pulvérulente. Si la dissolution renferme des sels à base insoluble ou peu soluble, comme c'est le cas pour l'eau de mer, on voit bientôt le cuivre se couvrir d'un dépôt basique terreux[1]. On avait cru un instant que le simple contact du cuivre ou du fer avec un

[1] La formation de ce dépôt a rendu malheureusement inapplicable le procédé de Davy, à la préservation du cuivre qui recouvre extérieurement les vaisseaux.

métal plus oxydable, tel que le zinc, les rendait inattaquables parce qu'il les constituait dans un état électrique particulier; mais M. Schoenbein a démontré, par une nombreuse série d'expériences, que le fer et le cuivre s'oxydent dans l'air, dans l'eau et dans une solution saline, aussi bien quand ils sont en contact avec du zinc que quand ils ne le sont pas, s'il n'y a pas de courant électrique; mais que dès qu'il peut s'en établir un, le métal négatif, c'est-à-dire celui qui reçoit l'hydrogène, n'est plus oxydé. La formation d'un dépôt provenant de la décomposition de la dissolution explique encore le fait observé par M. Van Beek, qu'un vase de cuivre rempli d'eau de mer, après avoir été pendant quarante-sept jours uni voltaïquement au moyen d'un fil de platine à une lame de fer plongée dans le même liquide, et avoir été ainsi préservé de toute oxydation, continua à l'être quand le fil de platine qui unissait le cuivre au fer eût été rompu; mais l'eau de mer ayant été changée, ce qui fit évidemment disparaître la couche préservatrice déposée sur la surface du cuivre, celle-ci recommença à s'oxyder.

Après avoir bien établi la théorie du couple voltaïque, il nous reste à montrer comment on peut renforcer l'intensité de l'électricité à laquelle il donne naissance. Pour rendre plus claire l'exposition que nous allons faire, nous désignerons sous le nom de *force électro-motrice* d'un couple, la force avec laquelle les molécules du liquide électrolytique qui entre dans la formation de ce couple sont polarisées, force qui dépend, quand l'élément négatif du couple est inactif (platine et zinc), de l'affinité seule de l'élément positif pour l'un des éléments du liquide; qui dépend au contraire de l'affinité que possède pour l'autre élément du liquide l'élément négatif du couple, quand c'est lui qui est actif, et que le positif ne l'est pas (platine et peroxyde de plomb); et enfin qui dépend des deux affinités également, quand les éléments du couple sont actifs tous les deux (zinc et peroxyde de plomb). Notre définition de la force électromotrice est bien différente de celle qu'on en donne dans la théorie de Volta, où l'on désigne sous cette dénomination la force avec laquelle on suppose que dans le contact de deux corps

hétérogènes (platine et zinc), l'un se constitue à l'état négatif et l'autre à l'état positif.

La force électro-motrice d'un couple dépendant de l'affinité de ses deux éléments pour ceux du liquide électrolytique, on conçoit qu'elle doit varier avec la nature de ces deux éléments et avec celle du liquide, d'où résulte un nombre très-considérable de combinaisons voltaïques possibles. Nous indiquerons à la fin de ce chapitre les méthodes qu'on a employées pour mesurer cette force et l'application qu'on en a faite à la mesure de la puissance des différents couples voltaïques. Nous chercherons à voir en même temps jusqu'à quel point on peut trouver dans la mesure de la force électromotrice un moyen de mesurer la puissance même de l'affinité. Pour le moment, nous nous bornerons à exposer comment un couple étant donné, on peut augmenter sa force électromotrice. Nous prendrons pour cette exposition comme type le couple le plus simple, savoir : un couple formé d'une plaque de zinc amalgamé et d'une lame de platine, d'environ 100 cent. carrés de surface chacune, plongées dans de l'eau acidulée avec de l'acide sulfurique. Nous supposerons le liquide placé dans un vase de verre bien isolant et les deux lames métalliques munies chacune d'un appendice du même métal, bien isolé également (fig. 307).

La puissance électromotrice de ce couple pourra être appréciée, soit par l'électromètre condensateur, l'électricité dont se charge chacun des métaux dont il est composé étant perçue à l'état statique; soit par un rhéostat, cette même électricité étant manifestée à l'état dynamique par son action sur un galvanomètre magnétique. Pour augmenter la force électromotrice du couple, c'est-à-dire pour avoir une plus grande tension accusée par l'électromètre, ou une résistance plus grande surmontée au rhéostat avec la même déviation du galvanomètre, il suffira de placer à la suite de ce premier couple un second semblable, de façon que l'appendice platine du premier soit en contact avec l'appendice zinc du second, et par conséquent que l'appendice zinc du premier et l'appendice platine du second soient isolés. On aura, en faisant communiquer ces deux appendices respectivement avec les deux plateaux du condensateur, une tension

double de celle qu'on avait avec un seul couple; et en les faisant communiquer entre eux par le fil du galvanomètre et par celui du rhéostat, de manière à fermer le circuit, on produira un courant qui surmontera une résistance double de celle que surmontait le courant d'un seul couple. Avec trois couples disposés de même à la suite les unes des autres, la tension à l'état statique sera triple, et la résistance surmontée, à l'état dynamique, sera triple aussi, et ainsi de suite, de façon que pour n couples, la tension et la résistance seront n fois plus grandes[1].

Maintenant il est facile de comprendre pourquoi l'addition d'un second couple double la force qui polarise les molécules successives du liquide ainsi que celle avec laquelle s'opèrent leurs combinaisons et recompositions; pourquoi l'addition d'un troisième la triple, d'un quatrième la quadruple, et ainsi de suite. Prenons le cas de deux couples unis voltaïquement, comme nous l'avons indiqué plus haut. Si le zinc du second couple n'exerçait aucune action qui polarisât son liquide, ce zinc en communication avec le platine du premier recevrait et transmettrait aux molécules liquides en contact avec lui, une polarité égale à celle qu'il recevrait du platine, c'est-à-dire que la première molécule d'eau aurait son oxygène négatif, tourné vers le + du platine, et le liquide de chacun des deux couples serait polarisé de la même manière (fig. 309). Mais le zinc du second couple exerce sur son liquide une action polarisante semblable à celle du premier. Ces deux actions s'ajoutent évidemment l'une à l'autre, puisqu'elles ont lieu dans le même sens. De plus, à son tour, l'action polarisante de ce zinc se transmet au platine du premier couple avec lequel il est en contact, et de là au liquide et au zinc de ce couple, de sorte que les deux couples ont égale-

[1] Nous verrons dans un paragraphe suivant que la proportionnalité entre la tension que possède à l'état statique l'électricité produite par une certaine force électromotrice, est proportionnelle à la résistance qu'elle peut surmonter à l'état dynamique. Quant au rapport qui existe entre cette tension ou cette résistance d'une part, et le nombre de couples d'autre part, nous ne pourrons apprécier jusqu'à quel point il est rigoureusement exact que lorsque nous aurons pu connaître et par conséquent éliminer les circonstances qui tendent à le dissimuler.

Digitized by Google

ment leur force électromotrice doublée. On expliquera de la même manière pourquoi l'addition d'un troisième couple tri-

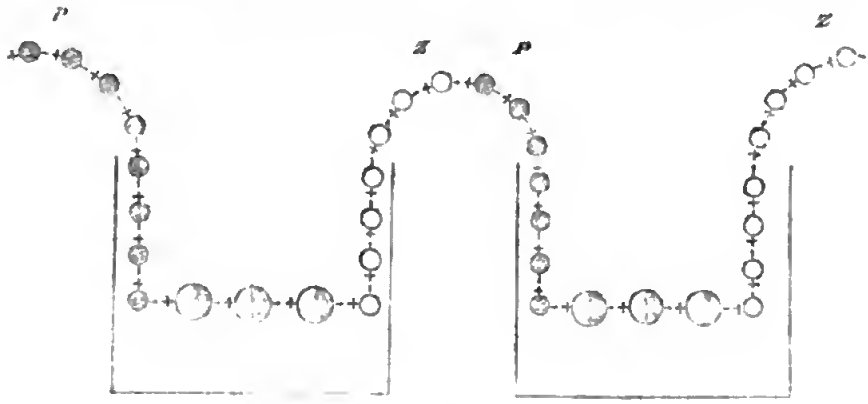


Fig. 309.

plera la force polarisante, et par conséquent la force électromotrice des trois couples également, et pourquoi s'il y a n couples ces forces seront rendues n fois plus grandes.

Ainsi quand on a une pile isolée composée d'un nombre quelconque de couples semblables, au moment où l'on fait communiquer ses deux pôles avec les deux plateaux d'un condensateur, ou avec le sol, on détermine une action chimique qui est accompagnée d'un dégagement d'électricité. Si la pile est composée d'un très-grand nombre de couples, la force électromotrice en devient assez puissante pour que l'action chimique ait lieu lors même que les pôles demeurent isolés; aussi en les faisant communiquer chacun avec un électroscope, on obtient, sans le secours du condensateur, la divergence des feuilles d'or. La tension électrique qu'acquiert chaque pôle dépend non-seulement de l'intensité de la force électromotrice, mais de la conductibilité plus ou moins imparfaite de la pile elle-même. En effet, les deux électricités accumulées respectivement à chacun des pôles tendent à se réunir par la pile même qui les sépare et qui joue le rôle d'un simple conducteur. L'expérience nous apprend, en effet, que cette réunion s'y opère comme dans un conducteur ordinaire[1], c'est-à-dire

[1] Voyez la manière dont l'électricité se distribue dans un conducteur qui réunit les deux pôles d'une pile. Tome II, pages 34 et suiv.

qu'à partir des deux pôles où elles ont leur maximum de tension, chacune des deux électricités va en diminuant de force jusqu'au milieu de la pile, où l'état électrique est zéro. Les électricités contraires dont les deux moitiés de la pile sont chargées ne peuvent pas provenir des couples intermédiaires, puisqu'il y a toujours dans chacun d'eux neutralisation des deux principes électriques; elles proviennent évidemment des extrémités, soit pôles de la pile où elles se renouvellent constamment. La tension des deux pôles serait la plus grande possible, si on pouvait concilier avec une grande force électromotrice, une conductibilité très-imparfaite de la pile; c'est ce qu'on réalise avec les piles sèches, comme nous le verrons dans le paragraphe que nous consacrerons à l'étude et à la comparaison des différentes espèces de piles.

Dans une série d'expériences que j'avais entreprises avec des piles chargées soit avec de l'eau pure, soit avec des dissolutions salines ou acides, je m'étais assuré que, pour obtenir la tension maximum, il fallait un temps d'autant plus long que le liquide était moins bon conducteur, et qu'on l'obtenait instantanément avec des liquides très-bons conducteurs, tels que des acides étendus d'eau. M. Gassiot, dans une série de recherches très-remarquables faites avec sa batterie à eau, composée de 3,520 couples de zinc et cuivre parfaitement bien isolés, est parvenu dès lors à des résultats complétement d'accord avec la théorie que nous avons exposée. Il a conclu de ses expériences que les effets statiques de la pile préexistent à la fermeture du circuit, et que celui-ci peut être fermé, quand la tension est forte, par une succession d'étincelles qui s'établissent entre deux surfaces métalliques polaires très-rapprochées l'une de l'autre. Il a encore observé que dans une pile telle que celle à eau, où l'action chimique ne s'exerce que difficilement, la tension ne se produit que lentement; mais il est parvenu à bien constater que les effets statiques, aussi bien que les effets dynamiques, ne peuvent être produits qu'autant que les éléments chimiques qui entrent dans la formation de la pile sont susceptibles de se combiner chimiquement entre eux. Il a trouvé également que plus l'affinité mutuelle de ces élé-

ments est puissante, moins il est nécessaire, pour produire de grands effets de tension, que le nombre des couples soit considérable. Ainsi il a obtenu, avec une pile composée de 100 couples de Grove bien isolés, une tension aux deux pôles aussi prononcée qu'avec la pile à eau de 3,520 couples, et en particulier des étincelles entre deux disques de cuivre mis en communication chacun avec l'un des pôles et placés à une distance de $\frac{1}{1000}$ de pouce l'un de l'autre[1].

Il demeure donc bien établi que dans une pile, comme dans un couple, toute manifestation de signes électriques, aussi bien sous la forme statique que sous la forme dynamique, est accompagnée d'une action chimique correspondante. Cette action est excessivement faible pour une seule décharge, mais elle devient sensible quand on opère une succession de décharges, comme le fait Gassiot en déterminant une série d'étincelles entre les deux pôles de la pile à eau. Elle est surtout sensible quand, réunissant les pôles d'une pile par un bon conducteur, on amène la succession des décharges à s'opérer assez rapidement pour qu'elles constituent le courant. On peut alors non-seulement percevoir, mais même mesurer exactement l'action chimique, et on la trouve à la fois la même dans chaque couple, et équivalente pour chacun des couples, à ce qu'elle est, extérieurement à la pile, dans un électrolyte placé entre les pôles. C'est ce que nous avons encore à démontrer pour achever l'exposition de notre théorie.

Il est d'abord bien évident que dans un seul couple, zinc et platine, la quantité d'hydrogène dégagée sur le platine doit être exactement équivalente à la perte en poids du zinc, du moins

[1] M. Gassiot a même réussi à obtenir des signes de tension au moyen d'un électroscope à feuilles d'or très-sensible, avec un seul couple de Grove bien isolé. Au fond la difficulté qu'on rencontre à obtenir des signes d'électricité bien marqués vient de ce qu'on n'isole pas assez bien les couples, ce qui n'est pas toujours facile, surtout quand il s'agit de piles chargées avec des acides comme celle de Grove. Aussi c'est au moyen d'une construction particulière, et en ne faisant usage que de vases en verre pour contenir la dissolution acide, que Gassiot a réussi à obtenir avec 100 couples de Grove le même effet qu'avec sa batterie à eau.

s'il n'y a pas d'action locale sur ce métal ; s'il y en a, il faut tenir compte de l'hydrogène dégagé à la surface du zinc. Faraday, par des mesures et des pesées exactes, a constaté ce point essentiel.

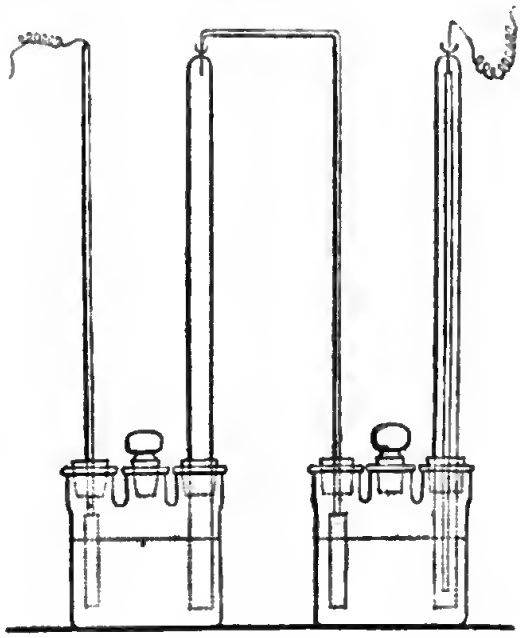


Fig. 310.

Si, au lieu d'un couple, on a une pile composée d'une série de couples zinc amalgamé[1] et platine, disposée de façon qu'on puisse mesurer exactement le gaz hydrogène dégagé par le platine, et enlever facilement les zincs pour les peser, on trouve que la quantité d'hydrogène est exactement la même dans chaque couple et dans un voltamètre placé dans le circuit, et qu'elle est en même temps équivalente au zinc consommé, que par conséquent celui-ci l'est aussi à l'oxygène du voltamètre.

Pour bien faire cette dernière expérience, on construit chaque couple (fig. 310) au moyen d'un flacon en verre rempli d'une dissolution d'acide sulfurique bien pure; ce flacon est percé de trois ouvertures : l'une au centre, fermée par un bouchon en verre, par laquelle on introduit le liquide : les deux autres de chaque côté de la centrale, l'une servant à introduire le zinc amalgamé, l'autre destinée à recevoir à frottement juste un

[1] Il faut que le zinc soit bien amalgamé pour éviter toute action locale.

tube gradué ouvert par le bas et fermé par le haut, qu'on remplit de liquide, et dans lequel on place un fil ou une lame de platine, dont l'extrémité supérieure ressort à travers le haut du tube, en se terminant par une pince ou par un petit godet métallique rempli de mercure. On dispose plusieurs couples semblables à la suite les uns des autres, en ayant soin que les fils métalliques soudés aux zincs aboutissent respectivement au platine de chaque couple consécutif; puis on ferme le circuit avec un conducteur quelconque, par exemple, avec un voltamètre; et quand l'action a duré quelque temps, on mesure le gaz hydrogène dans chaque couple et dans le voltamètre, et on pèse les zincs. C'est ainsi qu'on constate l'exactitude de la loi que nous avons posée. Pour la prouver avec un seul couple, il suffit (fig. 311) de faire communiquer le zinc avec le platine du même couple.

Fig. 311.

On peut remplacer dans le circuit l'eau acidulée du voltamètre par un électrolyte quelconque, tel qu'un sel métallique, et on trouve toujours que le métal réduit est équivalent à l'hydrogène de chaque couple. Ajoutons encore que la loi des équivalents pour les couples d'une pile avait été signalée pour la première fois, après que Faraday l'avait prouvée pour un seul, par M. Matteucci qui l'avait constatée en se servant pour charger les couples d'un sel de cuivre.

Ainsi donc, quand on réunit les pôles d'une pile par un électrolyte, la quantité d'effet produit dans cet électrolyte est équivalente à l'action chimique ou à la dépense chimique qui a lieu dans chaque couple. Si la pile a dix couples, par exemple, il faut consommer dix équivalents de zinc pour décomposer un équivalent d'eau, vingt lorsqu'il y a vingt couples. Il semblerait donc bien plus avantageux de n'employer qu'un ou deux couples, puisque pour produire le même effet on dépenserait vingt ou dix fois moins de zinc. Mais, outre que la décompo-

sition serait beaucoup moins rapide, ce qui présenterait de graves inconvénients dans bien des cas, il y a un grand nombre d'électrolytes qui ne peuvent être décomposés qu'autant que le courant a une certaine intensité, ou, ce qui revient au même, que la force électromotrice a une certaine puissance qu'on ne peut lui donner qu'en multipliant le nombre des couples. Il en est de même pour les résistances à surmonter. Ainsi, lorsqu'un courant est appelé à traverser un très-long fil télégraphique, il faut qu'il soit produit par une pile à couples nombreux (ce qui occasionne plus de dépense de zinc), parce que, s'il n'était produit que par un ou deux couples, il n'aurait pas assez d'intensité pour surmonter la résistance du fil.

Toutefois il existe une manière d'augmenter la force électromotrice d'un couple, et par conséquent l'intensité de son courant, sans qu'il soit nécessaire d'y ajouter un second ou un troisième couple, c'est de le faire traverser par un courant d'induction, dirigé dans le même sens que le courant même du couple. Ce courant d'induction, qui seul décomposerait l'eau, ajoute son effet à celui du couple, en augmentant sa force polarisante et en facilitant la décomposition et recomposition des molécules successives de l'eau. J'ai déjà décrit un appareil que j'ai imaginé dans ce but [1], dans lequel c'est le couple lui-même qui produit le courant induit dont l'effet doit être d'augmenter sa propre force; et j'ai fait voir qu'un couple qui ne pouvait décomposer l'eau d'une manière sensible, devient par cet artifice capable de donner à un voltamètre à fils de platine chargé avec de l'acide sulfurique au dixième, jusqu'à 20 cent. cubes de mélange gazeux par minute. Il est vrai qu'on ne fait pas une économie de zinc, car outre celui qui est consommé au moment où le courant circule à travers le voltamètre et qui est équivalent à l'eau décomposée, on en dépense une certaine quantité dans l'instant où le courant du couple, au lieu de traverser le voltamètre, passe à travers le fil de la bobine pour produire l'aimantation qui donne naissance à l'induction. On éviterait cette dépense en développant l'induction au moyen d'un aimant, mais alors

[1] Tome I, page 391, figure 148.

il faudrait une force mécanique pour opérer la rotation de l'appareil d'induction. Ce serait, il est vrai, plus économique, puisqu'on ne dépenserait qu'une quantité de zinc équivalente à l'effet chimique obtenu, mais au point de vue mécanique, on aurait toujours besoin d'une force équivalente dans son effet, quoique d'une nature bien différente, à celle qu'aurait produite le zinc qu'on aurait économisé. De plus, il faudrait plus de temps pour obtenir le même résultat chimique.

En résumé, il résulte de l'analyse que nous venons de faire que la loi des équivalents électro-chimiques découverte par Faraday, et que nous avons exposée d'abord en ce qui concerne la décomposition des électrolytes placés dans le circuit extérieurement à la pile [1], est générale et s'applique aussi bien à ce qui se passe dans l'intérieur même de la pile qu'au dehors. On peut donc considérer le circuit d'une pile quand il est fermé, comme un système de conducteurs unis bout à bout, dans la série desquels le courant circule d'une manière parfaitement uniforme et identique, circulation qui s'opère par une succession de polarisations et de recompositions des électricités contraires des molécules consécutives, de telle façon que cette opération est accompagnée de dégagement de chaleur quand elle rencontre une certaine résistance, et de décompositions chimiques quand les molécules sont composées. Mais tous ces effets sont équivalents dans toutes les parties d'un même circuit, la pile comprise; nous venons de le prouver en ce qui concerne les effets chimiques, et nous avons déjà vu qu'il en était de même pour les effets de chaleur [2].

Il nous resterait à examiner quelle est l'influence du nombre des couples sur les effets qui exigent une grande rapidité dans la circulation du courant, tels que les effets de chaleur, ainsi que la modification qu'apporte dans une pile l'introduction d'un ou plusieurs couples plus forts ou plus faibles que les autres, ou simplement celle de diaphragmes métalliques homogènes, soit couples inactifs. L'influence de ces circonstances

[1] Tome II, pages 296 et suiv.
[2] Tome II, page 191.

Digitized by Google

et de quelques autres qu'il est inutile d'énumérer ici dépendant de causes que nous ne pourrons apprécier qu'après avoir achevé l'étude du dégagement de l'électricité dans les différentes formes sous lesquelles s'exerce l'action chimique, ce n'est qu'à la fin de ce chapitre que nous les pourrons évaluer ; c'est ce que nous ferons dans le paragraphe où nous comparerons les différentes espèces de piles les unes aux autres, quant à leur puissance envisagée sous différents rapports. Nous verrons également alors le rôle que joue l'étendue de la surface des couples, rôle du reste facile à comprendre dès à présent, car la grandeur de la surface ne pouvant influer que sur la quantité d'action chimique exercée dans un temps donné, elle ne peut en rien modifier la force électromotrice du couple ou de la pile, ni par conséquent la faculté du courant produit à surmonter cette résistance. Remarquons seulement que cette résistance, quand elle dépasse un certain point, limite elle-même la quantité d'action chimique efficace par la quantité d'électricité qui peut être transmise dans un temps donné, et rend, par conséquent, inutile une augmentation de la surface au delà d'une certaine grandeur, grandeur qui est elle-même en rapport avec celle de la résistance.

§ 2. Production d'électricité dans l'action chimique des dissolutions les unes sur les autres.

M. Becquerel est le premier physicien qui ait montré qu'en faisant réagir l'une sur l'autre deux dissolutions conductrices

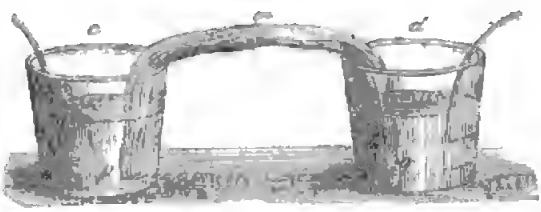


Fig. 342.

de l'électricité, et capables d'exercer mutuellement l'une sur l'autre une action chimique, quelque faible qu'elle soit, on ob-

tient une manifestation électrique sous forme de courant. Pour observer cet effet, on fait communiquer (fig. 312) les deux extrémités d'un galvanomètre respectivement avec deux lames de platine bien décapées, qu'on plonge l'une dans un verre *a* rempli d'acide nitrique, et l'autre dans un verre *c* rempli d'une solution de potasse, par exemple; puis on réunit les deux liquides par une mèche *p m q* de coton ou mieux d'amiante humectée par de l'eau légèrement acide ou salée. Aussitôt il y a production d'un courant qui va de la potasse à l'acide à travers la mèche, et par conséquent de la lame de platine qui plonge dans l'acide à celle qui plonge dans la potasse, à travers le galvanomètre. Davy ayant attribué la production de l'électricité, dans l'expérience que nous venons de rapporter, au contact du platine avec l'acide nitrique d'un côté et avec la potasse de l'autre, M. Nobili montra, contrairement au résultat obtenu par Davy, qui avait employé un galvanomètre trop peu sensible, qu'on peut obtenir un courant prononcé en évitant le contact du platine avec l'acide et l'alcali. Il faut donc, pour se mettre à l'abri de cette objection, modifier légèrement la disposition de l'expérience de M. Becquerel; en conséquence, on fait plonger les deux lames de platine du galvanomètre dans deux capsules remplies toutes les deux d'une dissolution de nitrate de potasse, puis on fait communiquer, au moyen d'une mèche d'amiante, les deux capsules respectivement, l'une avec l'acide nitrique, l'autre avec la dissolution de potasse; l'acide et la potasse étant également mis en communication par une mèche semblable, on obtient un courant analogue au précédent, mais plus faible à cause de l'imparfaite conductibilité du nitrate de potasse et d'une influence particulière qui résulte du contact de l'acide nitrique avec la lame négative de platine, dont nous parlerons plus loin. MM. Nobili et Becquerel ont également réussi à obtenir ce courant en remplaçant la dissolution de potasse par un morceau de potasse caustique; le premier en plongeant le morceau de potasse dans l'acide après l'avoir fixé à l'extrémité de la mèche de coton, dont l'autre extrémité plonge dans l'un des vases remplis de nitrate de potasse; le

second en prenant une cuiller de platine remplie d'acide nitrique, et en y plongeant la potasse tenue par une pince de platine, la cuiller et la pince étant mises respectivement en communication avec les deux bouts du fil galvanométrique.

Pour éviter toute objection, M. Becquerel a encore opéré d'une autre manière, par laquelle on évite également le contact du platine avec les substances différentes; il plonge les deux lames de platine du galvanomètre dans deux verres remplis l'un et l'autre également d'acide nitrique; puis il les fait communiquer au moyen d'une mèche de coton imbibée d'eau et longue d'un décimètre, en ayant soin, vu sa longueur, de la soutenir par un tube de verre; vers le milieu de cette mèche on pose doucement avec un tube, à côté l'une de l'autre, une goutte d'acide et une goutte de potasse dissoute. Tant que les deux gouttes sont séparées il n'y a aucun effet; mais dès l'instant que leur réunion a lieu, il y a production d'un courant électrique allant directement de la potasse à l'acide et de l'acide à la potasse à travers tout le circuit. En substituant d'autres acides à l'acide nitrique, les résultats sont les mêmes, mais plus ou moins prononcés, suivant l'énergie de l'action chimique et la conductibilité des liquides.

On peut employer, au lieu d'eau, pour humecter la mèche de coton ou l'amiante, une dissolution saturée de nitrate de potasse ou d'un autre sel, tel que le sulfate de soude. Dans ce cas, l'acide et l'alcali, dans lesquels plongent les extrémités de la mèche, exercent sur elles des actions chimiques qui donnent naissance à des courants plus faibles que celui qui résulte de l'action de l'acide et de l'alcali l'un sur l'autre, mais dirigés dans le même sens. Ces courants partiels sont les seuls qui se manifestent au moment même où l'on opère au moyen de la mèche humectée la réunion de l'acide et de l'alcali; aussi l'effet est-il plus faible; mais au bout de peu d'instants, si la mèche n'est pas trop longue, il s'y fait une infiltration de l'acide et de l'alcali qui, finissant par se rencontrer, se combinent en renforçant considérablement le courant. Ainsi de l'acide nitrique et de la potasse, réunis par une mèche imprégnée de sulfate de soude, n'ayant donné en commençant qu'une déviation con-

stante de 4 à 5°, au bout de quelques instants en donnèrent une également constante de 20°, ce qui correspond à une force huit à dix fois plus grande au moins. La première déviation était évidemment le résultat des courants provenant des actions chimiques respectives de l'acide et de l'alcali sur le sulfate de soude de la mèche, et la seconde de l'addition à ces courants de celui que produisait l'action directe de l'acide sur l'alcali. Les courants dus à l'action exercée sur la dissolution dont la mèche est imprégnée varient avec la nature de cette dissolution et des liquides dans lesquels plongent les extrémités de cette mèche. On obtient encore des effets prononcés en humectant la mèche avec la dissolution d'un sel dont l'acide et la base sont les mêmes que les acides et les bases des dissolutions dans lesquelles on plonge ses extrémités, par exemple une dissolution de nitrate de potasse avec l'acide nitrique et la potasse; ce qui prouve que même dans ce cas il y a encore une action chimique, tenant probablement à l'effet de la masse ou au degré de concentration des dissolutions.

L'action chimique des acides sur les acides peut également donner naissance à des courants électriques; ainsi, si l'on verse dans l'une des branches d'un tube courbé en U (fig. 313) de l'acide sulfurique concentré, et dans l'autre de l'acide nitrique, de manière que les deux liquides se touchent en *m*, sans se mélanger, ce qui est facile à obtenir à cause de leur différence de densité, on produit, en plongeant les extrémités de platine *a* et *b* du galvanomètre respectivement dans les deux acides, un courant qui va directement de l'acide nitrique *d* au sulfurique *c*, le premier des acides jouant le rôle de base par rapport au second; l'acide phosphorique produit avec l'acide nitrique le même effet que le sulfurique, et joue vis-à-vis du sulfurique le même rôle que le sulfurique vis-à-vis du nitrique.

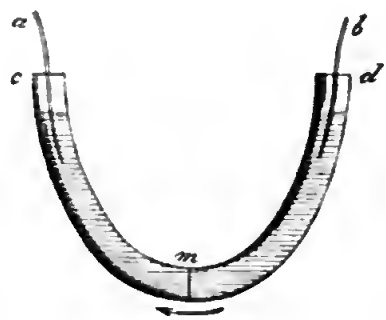


Fig. 313.

Voici l'ordre dans lequel on peut placer les diverses solutions conductrices, de manière que chacune soit négative par rapport à celles qui suivent et positive avec celles qui précèdent[1] :

Acide phosphorique, acide sulfurique, acide nitrique, acide hydrochlorique, acide acétique, acide nitreux, dissolutions salines, dissolutions alcalines.

Il y a cependant des cas où des dissolutions salines sont négatives avec certains acides, et positives avec certaines bases ; mais ce sont des exceptions qui tiennent à ce que le phénomène est complexe. Remarquons que l'eau joue en général le rôle de base avec les acides, et d'acide avec les bases. C'est probablement à l'affinité considérable qu'ont pour elle les acides phosphorique et sulfurique, d'où résulte qu'ils la prennent aux autres dissolutions, qu'il faut attribuer le fait que ces acides sont à la tête des liquides dans le tableau ci-dessus.

Ajoutons que pour étudier ainsi les courants qui naissent de l'action mutuelle des diverses dissolutions, il est préférable de recourir à la première manière d'opérer (fig. 312), en réunissant les deux liquides dans lesquels plongent les deux lames de platine par une mèche d'amiante. Il faut en même temps avoir toujours soin de bien nettoyer avant chaque expérience les lames de platine en les faisant rougir, puis les mettant dans de l'acide nitrique bouillant, et enfin les lavant dans de l'eau distillée. Puis cela fait, on s'assure que, plongées dans le même liquide, dans de l'acide nitrique par exemple, elles ne produisent aucun courant ; ce qui prouve que leur surface est bien nette. Malgré cette précaution, il arrive toujours que, dès que par une action chimique, quelque légère qu'elle soit, un courant a été produit, les lames de platine sont polarisées par l'effet de dépôts gazeux ou autres, provenant de l'effet chimique du courant sur les liquides qu'il traverse, et que cette polarité que nous avons appelée secondaire tend à produire un courant

[1] Nous appelons toujours positif le corps (dans ce cas liquide) d'où part le courant, soit l'électricité positive, pour aller directement à celui qui agit chimiquement sur lui, et de celui-là revenir au premier à travers le fil du galvanomètre.

inverse de celui qui l'a déterminée. Il en résulte que l'intensité du courant principal en est fort affaibli, et même quelquefois au point que ce courant n'est plus sensible.

Pour éviter ce grave inconvénient, M. Becquerel a imaginé un appareil qu'il a appelé *dépolarisateur*, et qui consiste dans une disposition de conducteurs auxquels on fait faire l'office de rhéotomes, soit de commutateurs. Par cet artifice, qui, au moyen d'un mouvement de rotation combiné avec un mouvement de haut en bas et de bas en haut, fait sortir à la fois chacune des lames de platine de la dissolution dans laquelle elle plonge pour la plonger dans l'autre, ces lames sont mises alternativement en communication avec l'une et avec l'autre des deux dissolutions, tout en restant respectivement unies avec le même bout du galvanomètre, ce qui fait que la déviation de l'aiguille a toujours lieu dans le même sens. De cette manière, le courant dû à la polarisation des lames s'ajoute à celui qui est dû à la réaction chimique des deux liquides, au lieu de le diminuer ou de le détruire. Si l'appareil interrupteur chemine vite, et que le courant que produit l'action des deux dissolutions soit constant, la déviation de l'aiguille n'éprouve aucune variation pendant que les lames de platine sont en mouvement.

On peut, avec l'appareil dépolarisateur, découvrir des sources d'électricité dans les plus légères actions chimiques, telles que celles, par exemple, que produit la réaction de l'eau distillée sur les diverses dissolutions. Ainsi, en plaçant entre les deux verres où plongent les deux lames de platine de l'appareil dépolarisateur, une succession de quatre mèches de coton mises en contact à la suite les unes des autres, dont la première et la dernière sont imprégnées d'eau distillée, tandis que la seconde est imprégnée d'eau saturée de sous-carbonate de soude, et la troisième d'eau saturée de bicarbontate de soude, on obtient dans ce circuit un courant qui va directement du sous-carbonate à l'eau. Ce courant est la différence entre des courants allant en sens contraire ; en effet, entre l'eau et le sous-carbonate on a un courant allant de la dissolution saline à l'eau, entre le bicarbonate et l'eau il va de l'eau au bicarbonate, et entre le bicarbonate et le sous-carbonate il va du bicarbonate

au sous-carbonate. L'expérience démontre que la somme des deux derniers, inverses du premier, est moins forte que lui.

C'est à un effet du même genre qu'il faut attribuer le développement de l'électricité obtenu par M. Foucault dans la série suivante de conducteurs humides en contact : *eau*, *acide sulfurique*, *potasse*, *eau*, *acide sulfurique*, *potasse*, *eau*, etc. On a là trois actions chimiques qui donnent trois courants dirigés : 1° *eau* et *acide sulfurique*, de l'eau à l'acide; 2° *acide sulfurique* et *potasse*, de la potasse à l'acide; 3° *potasse* et *eau*, de la potasse à l'eau. L'expérience de M. Foucault démontre seulement que le premier et le troisième courants dirigés dans le même sens l'emportent sur le second dirigé en sens contraire, et ne peut point fournir la preuve, comme l'avait cru ce physicien, d'une conductibilité physique propre aux liquides.

On peut donc former des piles composées uniquement de deux liquides réagissant l'un sur l'autre et d'un seul métal, servant d'arc de communication entre les liquides différents de deux couples consécutifs. On sépare ordinairement les liquides destinés à agir l'un sur l'autre par un diaphragme poreux, soit en terre, soit en tissu organique. Il est des cas où la différence de densité entre les deux liquides permet de les mettre en contact en les superposant simplement l'un à l'autre, ainsi que nous l'avons vu plus haut quand nous avons montré l'action de l'acide nitrique ou même de l'acide sulfurique étendu sur de l'acide sulfurique concentré. C'est en opérant de la même manière que Berzélius avait construit une pile dans laquelle un certain nombre de

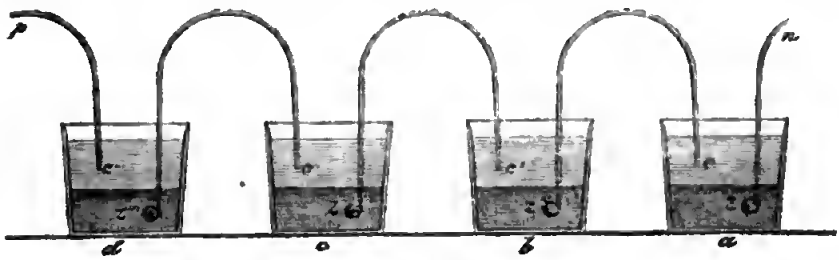


Fig. 314.

capsules de verre *a*, *b*, *c*, *d*, (fig. 314) étaient remplies à moitié d'une solution concentrée d'hydrochlorate de chaux, et à moitié d'une couche d'acide nitrique étendu qui, plus légère, ne se

mélangeait point avec la solution saline. Des arcs de cuivre c, c', c'', c''', terminés à leurs extrémités par de petites pièces de zinc, z, z', z'', z''' servaient à réunir les capsules en étant disposés de telle façon que l'extrémité zinc de chacun plongeât entièrement dans la solution d'hydrochlorate de chaux, et l'extrémité cuivre dans la couche supérieure d'acide de la capsule suivante. Dans cette pile, le zinc, quoique faiblement attaqué, est positif par rapport au cuivre, qui éprouve une action chimique très-vive de la part de l'acide, et de plus, dès que le circuit est fermé, les zincs qui étaient restés parfaitement nets et brillants dans la dissolution saline perdent leur éclat et s'oxydent, tandis que les cuivres cessent d'être attaqués. Quoique dans la théorie chimique de la pile telle que nous l'avons exposée, cette expérience ne soit pas une objection contre cette théorie, puisque c'est la nature bien plus que la vivacité de l'action chimique qui détermine le sens du courant, cependant l'effet tient surtout ici à l'action chimique mutuelle des deux liquides, et l'oxydation du zinc, ainsi que la réduction du cuivre oxydé, ne sont que le résultat de la transmission à travers ces métaux du courant provenant de cette action. On obtient en effet le même courant en remplaçant les arcs métalliques zinc et cuivre par des arcs homogènes de zinc, de cuivre ou de platine. Le courant est seulement plus fort avec des arcs de zinc qu'avec des arcs de cuivre ou de platine, et même qu'avec des arcs hétérogènes cuivre et zinc, ce qui tient à ce qu'il éprouve une facilité d'autant plus grande à passer d'un liquide dans un métal que ce métal est plus oxydable.

M. Nobili, qui l'un des premiers avait fait une étude détaillée des courants produits par l'action des dissolutions les unes sur les autres, en se servant soit du galvanomètre, soit de la grenouille comme galvanoscope, avait obtenu des effets électriques en faisant agir des acides sur des sels formés avec les mêmes acides, tels que l'acide sulfurique sur des sulfates, l'acide nitrique sur des nitrates, etc. Dans les doubles décompositions, le courant est le plus souvent nul ou du moins très-faible.

Parmi les méthodes qui ont été proposées pour déterminer l'électricité développée dans la réaction chimique de deux liqui-

des l'un sur l'autre, nous signalerons encore celle de M. Mousson, qui consiste à prendre deux disques de 5 cent. environ de diamètre, de platine ou d'argent, qu'il met en communication métallique avec les deux bouts du fil d'un galvanomètre; puis il applique respectivement, sur ces deux disques, deux disques de même diamètre de papier non collé et humectés des liquides sur lesquels on veut opérer; on rapproche alors parallèlement les deux disques et on les pose avec pression l'un sur l'autre. La déviation de l'aiguille indique aussitôt l'existence et l'intensité du courant. Quoique le galvanomètre employé par M. Mousson fût très-peu sensible, les effets observés étaient très-prononcés. Ainsi, avec l'acide nitrique et la potasse, l'aiguille pirouettait plusieurs fois; avec la potasse et le nitrate de potasse, elle déviait de près de 80°; mais dans ce cas l'effet est dû à la réaction de la potasse sur l'eau qui ne donne, il est vrai, quand on la produit directement, qu'une déviation de 25 à 30°, à cause du défaut de conductibilité; l'ammoniaque et l'eau pure donnent 30°; l'acide nitrique et l'eau 90°. Les acides sulfurique et hydrochlorique présentent de nombreuses anomalies dans l'électricité qui résulte de leur action sur l'eau et même sur quelques autres dissolutions, ce qui tient probablement pour le premier aux effets de la chaleur dégagée, et pour le second, à ce que le chlore doit agir sur les métaux servant d'électrodes. Les effets de l'acide nitrique sont plus réguliers.

Nous venons de voir que les dissolutions peuvent agir les unes sur les autres de manière à donner lieu à des effets électriques qui indiquent qu'il s'opère de véritables combinaisons chimiques. Mais quelquefois il n'y a qu'une simple dissolution et non pas combinaison; or il n'est pas toujours facile de distinguer quel est celui des deux phénomènes qui a lieu quand les réactions sont trop faibles pour qu'on puisse trouver des traces des composés nouveaux, ou apercevoir une élévation de la température. M. Peltier, pour résoudre cette question, se sert de deux capsules de platine remplies l'une d'eau distillée et l'autre de la dissolution qu'on veut examiner; puis il les joint par une mèche de coton ou d'amiante, en ayant soin de faire communiquer les deux capsules avec les extrémités d'un galvano-

mètre à long fil. Si le corps dont on veut reconnaître l'action sur l'eau est solide, on remplace la capsule par une pince de platine entre les branches de laquelle on le place; un trépied thermo-électrique composé de trois couples bismuth et antimoine, dont les extrémités inférieures sont de rang pair ou impair, reçoit la capsule où est l'eau. S'il y a combinaison, au moment où les deux capsules étant réunies il y a dissolution, il s'opère un réchauffement qui est accusé par un galvanomètre à fil court lié au trépied thermo-électrique, et il y a en même temps déviation du galvanomètre à fil long qui accuse le courant dû à l'action chimique. S'il y a au contraire simplement solution, cet effet est indiqué par l'abaissement de température de la capsule, qu'accuse un courant thermo-électrique dirigé en sens inverse du premier. La direction du courant thermo-électrique suffit donc pour montrer s'il y a combinaison ou solution, lors même que les variations de température qui en résultent sont excessivement faibles. M. Peltier a consigné dans un tableau le résultat d'un très-grand nombre d'expériences, en indiquant en degrés galvanométriques la chaleur ou le froid produits par l'action de l'eau sur différentes dissolutions, ainsi que le sens du courant provenant de leur action chimique, courant qui n'est même jamais complétement nul, dans le cas où il y a froid produit, mais qui est alors très-faible. Nous ne reproduisons pas ici ce tableau, mais nous nous bornerons à remarquer que la plus grande chaleur est obtenue avec l'acide sulfurique, la potasse, la soude, la chaux, et le plus grand froid avec le nitrate et l'hydrochlorate d'ammoniaque, l'iodure de potassium, le sous-carbonate de potasse, le sulfate de zinc, ainsi qu'avec les acides borique, oxalique, citrique, etc., etc.

Fig. 315.

Revenons un instant à la réaction de l'acide nitrique sur la potasse, vu que l'étude de ce genre d'action a conduit M. Becquerel à la construction d'un appareil très-simple et pourtant très-curieux dans ses effets. Cet appareil a reçu le nom de *pile à gaz oxygène*,

à cause de la production de ce gaz sur une des lames de platine qui entrent dans sa construction. Voici comment on le construit (fig. 315).

C D est un flacon en verre, rempli d'acide nitrique et dans lequel plonge un tube A B, maintenu dans le col par un bouchon. Ce tube est fermé en B à l'aide d'un morceau de linge, puis d'une certaine quantité d'argile ou de kaolin gâché en pâte épaisse, de façon à occuper une épaisseur d'environ 1 cent.; un peu de coton humide, que l'on introduit dans le tube par l'extrémité A, empêche le mélange de l'argile avec le liquide que doit contenir A B. Dans ce tube on met une dissolution aqueuse de potasse. L'acide nitrique du flacon et la dissolution de potasse du tube sont donc en présence par l'intermédiaire de l'argile humide, comme elles l'étaient au moyen du coton dans les expériences précédentes; en plongeant alors deux lames de platine N et P, l'une dans le flacon, l'autre dans le tube, si ces lames sont en relation avec un multiplicateur, il en résulte un courant électrique énergique dans un sens tel que l'acide prend l'électricité positive, et l'alcali la négative. Mais ce n'est pas tout, si on réunit les deux lames P et N à l'aide d'un simple fil métallique, aussitôt on voit une multitude de petites bulles de gaz se produire autour de P dans la potasse; ce gaz est du gaz oxygène pur. Il se dégage pendant plusieurs jours, tant que le couple fonctionne. Cet effet est facile à expliquer : la circulation d'électricité due à la réaction des deux liquides s'établit dans le couple lui-même; le courant part de la lame P, traverse les deux liquides pour aller à la lame N, et revenir extérieurement de N à P; l'eau de la dissolution de potasse est décomposée, l'oxygène se dégage sur la lame P et l'hydrogène est transporté dans l'acide nitrique. Celui-ci absorbe l'hydrogène naissant et se colore peu à peu par suite de la présence des vapeurs nitreuses.

Le couple imaginé par M. Becquerel est le premier à courant constant qui ait été construit; cette circonstance tient à ce que les lames ne sont point polarisées, parce que le nitrate de potasse qui se forme est immédiatement décomposé par le courant, et que l'acide et l'alcali, transportés l'un à la lame P, l'autre à la lame N, se trouvent en contact, le premier

avec la potasse, le second avec l'acide nitrique, ce qui fait qu'ils se combinent immédiatement et ne restent pas sur les lames. On peut renforcer ce couple considérablement en substituant à la lame de platine qui plonge dans la potasse une lame de zinc amalgamé; cette lame, en s'emparant de l'oxygène, produit un courant qui s'ajoute au premier. Au moyen de ce couple ainsi modifié, on obtient une forte décomposition de l'eau acidulée placée dans un voltamètre à fils de platine. On peut également réunir voltaïquement, à la suite les uns des autres, plusieurs des couples de Becquerel, de manière à obtenir une pile très-puissante.

La pile à gaz oxygène a été l'objet de l'examen de plusieurs physiciens, soit au point de vue de ses effets, soit sous le rapport de la nature de l'action qui donne naissance à l'électricité qu'elle dégage. Ainsi M. Jacobi a réussi à décomposer de l'iodure de potassium en l'interposant extérieurement entre deux fils de platine soudés respectivement aux deux lames du même métal, plongées, l'une dans l'acide nitrique, et l'autre dans la potasse; il n'est pas parvenu à décomposer de même du sulfate de cuivre. Il n'a pas trouvé au couple de Becquerel une énergie dynamique en rapport avec son activité chimique, en se servant, pour apprécier la force de son courant, de l'action sur l'aiguille aimantée et de l'aimantation du fer doux. M. Fechner, d'un autre côté, avait fait un grand nombre d'expériences dans le but de prouver que le développement de l'électricité dans la pile de Becquerel tenait au contact respectif des lames de platine avec l'acide et la potasse. Il opérait au moyen de quatre verres successifs, dont les deux extrêmes étaient simplement remplis d'une solution conductrice de nitrate de potasse en général, et les deux du milieu, des deux solutions destinées à agir l'une sur l'autre, en particulier acide nitrique et potasse. Aussi appelait-il les deux verres *extrêmes conducteurs*, et les deux intermédiaires *producteurs*. Les expériences de Fechner avaient porté non-seulement sur l'acide nitrique et la potasse, mais aussi sur un grand nombre d'autres liquides. Il avait même remplacé les lames de platine par des lames d'autres métaux, ce qui compliquait les résultats en fai

sant intervenir, entre l'action mutuelle des deux liquides producteurs de l'électricité, celle des liquides sur ces lames, action que nous avons étudiée dans le paragraphe précédent. En ce qui concerne plus particulièrement la pile de Becquerel, Fechner avait démontré que, pour que l'effet de cette pile fût énergique, il fallait que le platine fût en contact avec l'acide nitrique, et qu'elle perdait presque toute sa force quand on disposait l'expérience de façon que les lames de platine fussent plongées dans deux vases remplis de nitrate de potasse, unis respectivement, au moyen de conducteurs humides, à l'acide nitrique et à la potasse qui agissaient toujours chimiquement l'un sur l'autre. Dernièrement, Matteucci a repris ce sujet, et, tout en confirmant le fait signalé par Fechner, il est parvenu à des résultats très-intéressants sur les effets électriques qui résultent de l'action mutuelle des diverses dissolutions les unes sur les autres.

Après quelques expériences sur l'intensité du courant obtenu par l'action des différents acides sur la potasse et sur quelques oxydes, et avoir reconnu que l'emploi de l'acide nitrique est toujours préférable, il a démontré comme Fechner l'avait fait, l'influence considérable qu'exerce sur l'intensité du courant le fait que l'acide nitrique est en contact avec le platine, et il a réussi à trouver des combinaisons voltaïques à deux liquides capables de produire des effets encore plus forts que la pile de Becquerel. Voici la disposition qu'il a adoptée pour faire ces diverses expériences : Un des liquides est contenu dans un bocal de verre, dans lequel plonge un vase cylindrique en terre poreuse qui est rempli de l'autre liquide; deux lames de platine, larges de 3 centimètres et hautes de 12, réunies ensemble par une pince métallique, plongent dans les deux liquides. M. Matteucci a également, dans quelques cas, mis les deux liquides dans deux cylindres poreux, plongés l'un et l'autre dans de l'acide sulfurique étendu de huit à dix fois son volume d'eau. C'est ainsi qu'il s'est assuré que le courant était presque aussi fort lors même que la potasse et l'acide nitrique n'étaient pas immédiatement en contact, mais qu'ils l'étaient l'un et l'autre avec

la dissolution d'acide sulfurique, pourvu que l'acide nitrique fût bien toujours en contact avec le platine. Le courant électrique était mesuré par la déviation de l'aiguille du galvanomètre comparable de Nobili et par la quantité d'eau acidulée décomposée dans un voltamètre dont les fils de platine avaient 1 ½ millimètre de diamètre et 25 millimètres de longueur. Dans quelques-uns, le courant était mesuré par le poids de cuivre déposé sur l'électrode négatif qui était, dans ce cas, une lame de platine semblable à celle employée dans la pile.

Les expériences de M. Matteucci avaient essentiellement pour objet l'étude, non pas seulement de simples couples, mais des piles formées de couples à deux liquides, comme le couple à oxygène de M. Becquerel. Les liquides successivement essayés étaient, d'une part, comme corps attaqués, des dissolutions concentrées de potasse caustique, de protosulfate de fer, de sulfate de potasse, d'hyposulfite de soude, de pentasulfure de potassium, de monosulfure de potassium[1]; d'autre part, comme corps attaquants de l'acide nitrique pur et concentré, une dissolution concentrée d'acide chromique, une dissolution d'acide sulfurique étendu de neuf fois son volume d'eau.

M. Matteucci s'est d'abord assuré qu'un seul couple de pentasulfure de potassium et d'acide nitrique décompose l'eau dans le voltamètre, et produit une déviation constante de 70 à 76° au galvanomètre; on peut également obtenir avec ce couple une étincelle bien distincte en interrompant le circuit à travers le mercure. Le monosulfure de potassium, mis à la place du pentasulfure, donne les mêmes effets avec la seule différence que l'action est plus constante. Les deux sulfures de potassium forment également, avec l'acide sulfurique, des couples moins forts, il est vrai, qu'avec l'acide nitrique, mais alors on voit l'hydrogène se dégager autour de la lame qui plonge dans l'acide. On peut accroître la force de ces couples en recouvrant la lame de platine qui plonge dans l'eau

[1] On obtient le monosulfure en saturant avec l'acide sulfhydrique une partie de potasse, et en la mélangeant avec une autre partie restée à l'état de potasse caustique. Quant au pentasulfure, on le prépare en faisant bouillir une dissolution concentrée de potasse caustique avec un excès de soufre.

acidulée d'une couche de peroxyde de plomb, mais alors on ne voit plus l'hydrogène se dégager. Un couple formé avec une dissolution concentrée d'hyposulfite de soude et de l'acide nitrique, ou de l'acide chromique, décompose l'eau, et donne une déviation constante de 40 à 45°. En remplaçant les acides par de l'eau rendue conductrice au moyen d'un peu de sel marin, on n'obtient que des effets électriques à peine sensibles avec les différentes dissolutions indiquées plus haut.

M. Matteucci ne s'est pas contenté d'étudier l'effet d'un seul couple, il a formé avec ces couples des piles dont il a mesuré la puissance. Ces diverses piles, composées de 12 couples, ont été d'abord deux piles, l'une acide nitrique et potasse, l'autre acide nitrique et pentasulfure de potassium. Cette dernière est la plus forte de toutes celles qu'on peut former avec deux liquides. En effet, elle donnait une déviation fixe de 75° et 71 centimètres cubes de mélange gazeux, tandis que celle à acide nitrique et potasse ne donnait que 11 centimètres cubes en 5 minutes, et qu'une déviation de 46 à 48°. Une pile de Grove, de 12 couples également, dégageait dans ce même voltamètre 133 centimètres cubes de mélange gazeux, c'est-à-dire pas tout à fait le double de ce que donnait la pile à acide nitrique et à pentasulfure. En interposant entre l'acide nitrique et le pentasulfure contenus dans deux cylindres poreux, une couche d'acide sulfurique étendu, on ne change en rien les effets de cette pile. Une pile de 12 couples, dont chacun était formé d'une dissolution saturée d'acide sulfureux et d'acide nitrique, renfermés dans les cylindres poreux, plongés de même dans la dissolution d'acide sulfurique, donnait 40 à 45° de déviation, et 6 centimètres cubes de mélange gazeux en 5 minutes. Les effets ont été à peu près les mêmes en substituant à la dissolution d'acide sulfureux celle de sulfite de potasse. Enfin, avec 12 couples formés d'acide nitrique et d'une dissolution concentrée de sulfate de protoxyde de fer, on obtient une déviation fixe de 16° et 80 centimètres cubes de mélange gazeux en 5 minutes.

M. Matteucci a réussi à constater que le dégagement d'électricité qui a lieu dans les piles à deux liquides est indépendant

de l'arc métallique, et cela en se servant, pour réunir ces liquides, du filet nerveux de la grenouille galvanoscopique, au moyen de deux tubes de verre remplis de sable tassé et humecté d'une dissolution de sel marin ou d'eau pure, communiquant d'une part aux deux points différents du filet nerveux, et d'autre part avec les deux liquides des couples. L'inspection des liquides, après que le circuit des différentes piles a été fermé pendant quelque temps, démontre d'ailleurs d'une manière évidente la présence d'une action chimique oxydante ou dégageant de l'oxygène autour de la lame de platine positive, et une action désoxydante ou dégageant de l'hydrogène autour de la négative[1].

Enfin, pour bien démontrer l'origine chimique de l'électricité développée dans les piles à deux liquides, M. Matteucci a cherché à mesurer en même temps les effets électro-chimiques produits dans les couples d'une pile en activité, et celui qui a lieu dans le voltamètre qui ferme le circuit. Avec la pile de 12 couples, acide nitrique et potasse, il a toujours trouvé la quantité d'oxygène un peu moindre dans l'intérieur de la pile que dans le voltamètre, surtout lorsque l'action était lente et que la surface de la lame en contact avec la potasse était considérable. Il est possible que cette différence tienne ou à la formation d'un bioxyde de potassium, ou à une action de l'oxygène sur le platine, en présence de la potasse. Peut-être trouverait-on dans ces actions la cause de l'influence évidente qu'exerce sur l'intensité du courant produit par cette pile, le contact du platine avec la potasse. Avec une pile de 12 couples d'acide sulfurique étendu et de monosulfure de potassium, la quantité d'hydrogène recueillie dans l'acide a été exactement la même que celle fournie par le voltamètre. Avec une pile de 12 couples de monosulfure de potassium et de sulfate de cuivre, la loi des équivalents s'est trouvée également vérifiée. Ainsi, la quantité de cuivre déposée sur deux lames de platine, prises, l'une dans un des

[1] Il ne faut pas oublier que nous appelons *positive* la lame d'où part le courant pour aller dans le liquide, et de là à l'autre lame que nous nommons *négative*, quoiqu'elle soit celle d'où semble partir le courant pour traverser le circuit extérieur.

couples, l'autre dans un voltamètre rempli d'une dissolution de sulfate de cuivre, s'est trouvée être presque exactement la même. Dans une expérience, elle a été de 0gr,9510 sur la lame négative de l'un des couples, et de 0gr,9485 sur l'électrode négatif du voltamètre.

Il est plus difficile de recueillir et de mesurer l'oxygène dégagé dans l'intérieur de la pile; cependant M. Matteucci y a réussi en formant une pile avec des couples composés d'une dissolution d'acide sulfureux et d'une dissolution de nitrate d'argent contenant 10 parties d'eau en poids pour 1 de nitrate. Après avoir évalué, par une expérience comparative, la quantité d'acide sulfurique qui est formée par l'oxygène de l'air, il a pu, en le dosant au moyen de la baryte, déterminer exactement la proportion de cet acide que produit dans l'acide sulfureux l'oxygène même qui provient de l'action de la pile. Après divers essais, et en prenant diverses précautions, il est parvenu à des résultats très-satisfaisants par leur exactitude. Ainsi, ayant obtenu 0gr,471 d'argent déposé sur la lame négative, il a trouvé, en tenant compte de l'acide sulfurique formé par l'oxygène de l'air, que la quantité de cet acide correspondant à l'argent réduit était de 0gr,1772, au lieu de 0gr,1744, qui avait été exactement l'équivalent de l'argent obtenu. La différence entre ces deux nombres est si petite, qu'on peut bien regarder comme démontré que la quantité d'oxygène qui, provenant de la décomposition de l'eau dans les couples, se combine à l'acide sulfureux, est équivalente à la quantité du nitrate d'argent qui est décomposé dans la pile.

Remarquons encore que dans les couples où entre l'acide nitrique, tels que celui acide nitrique et potasse, ce n'est pas seulement l'action de l'acide nitrique sur la potasse qui détermine le courant, mais surtout la présence de l'acide nitrique autour de la lame de platine, puisque, pourvu qu'on maintienne cette présence, on a presque autant d'effet en interposant une dissolution d'acide sulfurique entre l'acide nitrique et la potasse, et qu'au contraire l'intensité du courant devient très-faible en plaçant l'acide sulfurique en contact avec le platine et l'acide nitrique, entre la potasse et lui. Ces résultats

sont faciles à comprendre dans la théorie que nous avons donnée de la production de l'électricité dans un couple voltaïque. L'action de l'acide nitrique, comme celle de l'acide sulfurique sur la potasse, produit un courant dans lequel l'acide prend l'électricité positive et l'alcali la négative : ces deux électricités se réunissent immédiatement sur la surface même du contact des deux liquides à mesure qu'elles sont séparées; mais si le circuit est fermé au moyen d'un arc métallique, ces deux électricités peuvent se neutraliser en traversant ce circuit; toutefois elles ne peuvent le faire qu'en décomposant l'eau des dissolutions, et en particulier de celle de potasse. Or, cette décomposition est excessivement facilitée par la présence à l'électrode négatif d'un corps qui abandonne facilement son oxygène, tel que l'acide nitrique, et qui joue ainsi, dans ce cas, le même rôle que nous avons vu être joué par le peroxyde de plomb dans un couple zinc et platine. L'acide, comme le peroxyde, en se désoxydant au moyen de l'hydrogène de l'eau décomposée, ajoute encore à la force du courant. Il est facile de comprendre que l'acide sulfurique autour de la lame de platine ne peut produire le même effet.

Nous n'avons parlé jusqu'ici que des effets électriques qui accompagnent l'action chimique mutuelle de deux dissolutions; mais cette action n'est pas la seule qu'une dissolution puisse éprouver. Ainsi, elle peut être décomposée sans que l'intervention d'une seconde dissolution soit nécessaire. C'est ce qui arrive, par exemple, quand on fait évaporer dans un creuset chauffé de l'eau qui tient en dissolution un corps étranger. M. Pouillet qui, le premier, a fait ce genre d'observation, se servait d'une capsule, et même avec plus d'avantage d'une lame épaisse de platine légèrement creuse, qu'il faisait communiquer, après l'avoir chauffée au rouge, avec le plateau inférieur d'un condensateur, au moyen d'une tige soudée à ce plateau. Après s'être assuré que l'évaporation de l'eau pure ne dégageait pas d'électricité, il versait successivement dans le creuset quelques gouttes d'une dissolution, acide, basique ou saline. Il observa qu'avec une dissolution de strontiane la capsule, au moment de l'évaporation, gardait l'électricité po-

sitive pendant que la vapeur emportait la négative ; il en fut de même des autres dissolutions alcalines. L'ammoniaque seulement présente un effet inverse, parce qu'étant plus volatil que l'eau, il emporte l'électricité positive, et laisse à l'eau, et par suite à la capsule, l'électricité négative. Avec les dissolutions acides, c'est l'eau, par contre, qui est positive, et l'acide prend l'électricité négative. Avec une dissolution de sel marin il en est de même. Il paraît donc, d'après ces diverses recherches, que les effets électriques dans les décompositions chimiques sont inverses de ceux qui ont lieu dans les combinaisons. C'est, du reste, ce que nous avions déjà fait remarquer en faisant un couple avec une lame de platine et du peroxyde de manganèse et du peroxyde de plomb plongés dans de l'eau acidulée. La décomposition du peroxyde produit un courant qui va en sens inverse de celui qui résulterait de l'oxydation du métal. On peut encore constater l'exactitude de ce principe en projetant du bicarbonate de soude solide dans la capsule de platine chauffée au rouge ; ce sel se décompose en laissant échapper de l'acide carbonique qui emporte l'électricité négative, tandis que la capsule prend un fort excès d'électricité positive.

M. Peltier, qui a étudié avec soin ce sujet, remarque que l'électricité ne se produit point dans les expériences que nous venons de rapporter pendant toutes les phases de l'évaporation, mais seulement au moment où le liquide, quittant l'état sphéroïdal, éprouve une espèce de crépitation. Il en conclut que l'électricité n'est dégagée qu'au moment où a lieu une décomposition chimique provenant de la ségrégation de l'eau combinée, et non pendant la séparation de l'eau surabondante.

M. Gaugain est plutôt disposé à voir dans ces divers phénomènes le résultat du frottement contre les parois du creuset des particules d'eau projetées au moment de la décrépitation. Son opinion est basée sur le fait que l'évaporation lente, qui est pourtant accompagnée aussi d'une décomposition chimique, ne produit aucun effet, et, de plus, sur ce que l'électricité développée dans ce genre d'action ne communique pas instantanément au condensateur le maximum de charge qu'il

comporte, ce qui serait le cas, s'il s'agissait d'une source électrique ayant son principe dans l'action chimique; au contraire, la quantité d'électricité croît jusqu'à une certaine limite avec la durée de l'action, et a une valeur invariable indépendante de l'étendue des surfaces du condensateur, comme cela a lieu pour le frottement, tandis que lorsqu'il s'agit d'action chimique, non-seulement la charge est instantanée, comme nous venons de le dire, mais elle croît indéfiniment avec la surface du condensateur employé. C'est en opérant sur une dissolution de sel marin que M. Gaugain a fait ces observations. Il ne paraîtrait pas que l'électricité produite pût être due au frottement des particules du sel contre la surface du platine; car l'expérience directe faite en soufflant du sel marin sec et en poudre contre les parois d'un creuset de platine chauffé au rouge, a montré que ce creuset se chargeait d'électricité positive, et non de négative. Ce serait donc uniquement au frottement de l'eau que l'effet serait dû. Mais alors pourquoi l'eau distillée ne le produirait-elle pas également, et pourquoi aurait-il lieu dans une capsule évasée aussi bien que dans une étroite, tandis qu'il n'y a d'électricité dégagée par le frottement de l'eau pure que dans le second cas, et non dans le premier?

Nous sommes donc disposés à croire qu'il y a bien un effet électrique produit dans les ségrégations chimiques, de même qu'il y en a un dans les combinaisons, et que si sa manifestation n'a lieu en général que lorsque l'évaporation est très-rapide, cela tient, comme nous avons déjà eu l'occasion de le remarquer dans le paragraphe précédent, à ce qu'on évite mieux ainsi la recomposition immédiate des deux électricités.

C'est encore à la décomposition des dissolutions qu'on doit attribuer en très-grande partie les effets électriques qu'on obtient en plongeant dans un liquide deux fils de platine liés aux deux bouts d'un galvanomètre, et dont l'un a été chauffé au rouge, tandis que l'autre est demeuré froid. Toutes les fois que le fil chauffé prend au liquide l'électricité positive, ou, ce qui revient au même, joue dans le couple le rôle de métal négatif, l'électricité provient de la décomposition de la dissolution et le

fil joue le même rôle que jouait la capsule de platine dans les expériences précédentes; tandis que lorsqu'il prend l'électricité négative ou qu'il se conduit comme le métal positif, il est probable que l'électricité provient d'une action chimique exercée sur lui par la dissolution. C'est en effet la conclusion qu'on peut tirer des expériences faites par M. Henrici sur ce sujet. Ainsi il a trouvé que, soit avec l'acide chlorhydrique, soit avec une solution de potasse, le fil chauffé prend bien l'électricité négative, preuve qu'il est attaqué; ce qui doit avoir lieu effectivement dans ce cas. Avec les acides sulfurique et nitrique soit concentrés, soit étendus, le fil de platine chauffé prend au contraire l'électricité positive, parce que ce sont les dissolutions qui sont décomposées sous l'influence de la chaleur du platine.

En résumé, les effets électriques qui accompagnent les actions chimiques dans lesquelles les corps soumis à ces actions sont liquides, rentrent d'une manière générale dans les lois qui régissent les actions chimiques dans lesquelles l'un des corps est solide et l'autre liquide. Toutefois, comme pour percevoir l'électricité produite dans ces actions, il faut nécessairement employer un corps solide pour conducteur, il en résulte que quelque précaution qu'on prenne pour que ce corps soit inactif en le choisissant parmi les métaux inattaquables, tels que le platine, il n'est pas toujours possible d'éviter son intervention active, ce qui, dans ces cas-là, rend les phénomènes plus complexes. C'est en particulier ce qui résulte nécessairement de la circonstance que des lames métalliques inattaquables, aussi bien que celles qui sont attaquables, acquièrent une polarité secondaire, par le seul fait qu'elles ont transmis les courants développés dans les liquides. Nous allons voir dans le paragraphe suivant, qui est consacré à l'étude de cette polarité, comment on peut en tenir compte.

§ 3. Production d'électrité dans l'action chimique des liquides sur les couches minces dont sont recouvertes des surfaces solides. — Polarités secondaires, pile à gaz, fer passif.

Ritter avait observé qu'en formant une pile de disques de même métal, alternant avec des cartons humides, cet appareil

inactif par lui-même devenait capable de donner des effets semblables à ceux de la pile ordinaire, quand on l'avait interposé pendant quelques moments dans un circuit voltaïque. L'action de cette pile, que Ritter avait appelée *secondaire*, était d'autant plus forte que le courant qui l'avait chargée était plus énergique, que la surface des disques métalliques employés dans sa construction était plus considérable, et que le liquide, dont les cartons étaient humectés, était plus conducteur. Mais cette action n'était point permanente, elle cessait quand la pile avait fonctionné quelques instants. Volta, ayant examiné les piles secondaires de Ritter, déclara que la pile ordinaire ne leur transmettait aucune charge, mais que leur effet tenait à ce que le courant électrique, en les traversant, décomposait le liquide interposé entre les disques de métal homogènes, et recouvrait les surfaces de chacun de ces disques de deux solutions différentes, l'une acide, l'autre alcaline, quand le liquide employé était une solution saline, cas le plus fréquent. Cette opinion de Volta a été complétement confirmée par les recherches ultérieures et notamment par l'analyse détaillée que Marianini a faite des piles secondaires de Ritter. Le savant physicien italien a démontré que ce n'est point, comme Ritter l'avait cru, à la difficulté qu'elles opposent au passage de l'électricité, que les piles secondaires doivent leur pouvoir électromoteur, puisque plus elles transmettent facilement le courant de la pile active, plus elles se chargent fortement et facilement. Il a également prouvé que la cause de l'électricité que dégagent les piles secondaires est tout entière dans les altérations qu'éprouvent les surfaces des parties métalliques dans les portions où elles sont en contact avec les conducteurs humides, puisqu'on peut retourner et même changer ceux-ci sans détruire ni même diminuer le pouvoir de ces piles. Seulement cette altération n'est pas due, comme Marianini semblait le croire, à une modification physique qu'auraient éprouvée les surfaces métallliques, mais à une simple formation de dépôts provenant de l'action décomposante exercée par le courant transmis, sur le liquide de la pile secondaire; dépôts qui, par l'action chimique que le liquide exerce sur eux, sont l'origine de l'électricité dégagée.

Ajoutons encore, pour ne pas être appelé à revenir sur ce point peu important du reste, sauf, comme nous le verrons, en ce qui concerne l'influence qu'il exerce sur la force de la pile voltaïque, que la meilleure disposition à donner aux piles secondaires consiste à unir une série de vases remplis d'une dissolution conductrice, saline par exemple, par des arcs homogènes, de cuivre, même d'or ou de platine (fig. 316); puis quand on a transmis à travers ce système de couples inactifs

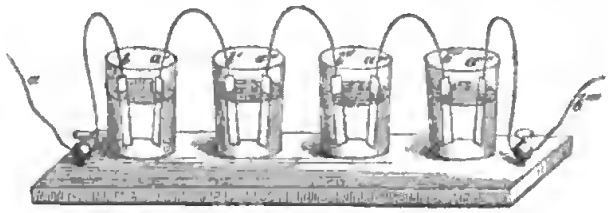


Fig. 316.

un courant qui doit avoir d'autant plus d'intensité que le nombre des couples inactifs est plus considérable, on trouve que la pile secondaire a acquis une charge électrique. Elle donne des signes de tension à ses deux extrémités et un courant capable d'agir sur l'aiguille, de produire de la chaleur, ou même une étincelle et de décomposer l'eau. Seulement la nature de l'électricité accumulée à ses deux pôles, ainsi que le sens du courant qui s'établit quand on réunit ces pôles, indique que ses extrémités ont pris des électricités contraires à celles des pôles de la pile voltaïque avec lesquels elles ont été mises en communication. C'est une conséquence évidente de la nature des dépôts que le courant initial a déterminés sur chaque partie de l'arc métallique, et du sens du courant auquel donne naissance l'action chimique du liquide sur ces dépôts respectifs.

Pour bien analyser cet ordre de phénomènes, il faut commencer par l'étudier sur un seul couple secondaire, et non sur une pile tout entière. Dans ce but on plonge dans un vase rempli d'un liquide conducteur deux lames du même métal; il est préférable d'employer le platine pour se mettre à l'abri de la réaction chimique directe du liquide sur le métal lui-même. On fait passer pendant quelque temps le courant d'une pile voltaïque à travers le liquide en se servant comme électrodes

des lames de métal; puis après avoir interrompu le courant, on met les lames en communication avec un galvanomètre, et aussitôt on observe un fort courant qui dure quelques instants et dont le sens est inverse de celui qui avait été transmis. On nomme *secondaire* ce courant par opposition à celui qui a chargé l'appareil et que l'on nomme *primaire*, et on désigne sous le nom de *polarité secondaire*, comme nous l'avons déjà vu, la propriété qu'ont acquise les lames métalliques en transmettant le courant primaire.

Toutes les fois que le liquide électrolytique est une solution saline, le courant produit par les polarités secondaires est facile à expliquer, ainsi que M. Becquerel l'a le premier démontré clairement; il se dépose en effet sur la surface de l'électrode négatif une couche d'alcali et sur celle de l'électrode positif une couche d'acide, qui, par l'action qu'exerce sur elles la solution, doivent produire un courant dirigé de l'alcali à l'acide dans le liquide, et par conséquent de la lame qui avait servi d'électrode positif à celle qui avait servi d'électrode négatif dans le fil du galvanomètre qui les unit. On peut produire le même courant sans employer la décomposition électrolytique, mais en plongeant simplement l'une des lames dans un acide, l'autre dans un alcali, et en les plaçant ensuite dans une dissolution conductrice, après les avoir unies avec les deux bouts d'un fil galvanométrique.

Il était moins facile d'expliquer la cause du courant secondaire développé quand les électrodes qui ont acquis la polarité sont simplement plongés dans l'eau pure ou acidulée, et où, par conséquent, le dépôt dont ils se recouvrent ne peut être que de l'oxygène ou de l'hydrogène. J'avais déjà, en 1826, constaté l'existence des polarités secondaires sur des lames ou des fils de platine quand la dissolution n'est que de l'eau légèrement acidulée avec de l'acide sulfurique. Je les avais attribuées à un état particulier de polarité qu'auraient contracté les électrodes eux-mêmes sous l'influence du courant; mais M. Becquerel ayant démontré que, lorsque le circuit est tout métallique, le phénomène n'a plus lieu, et que les électrodes ne le présentent que dans les parties de leur surface qui ont été en

contact avec le liquide électrolytique, il devenait naturel d'en voir la cause dans le dépôt des petites couches gazeuses sur la partie des électrodes où s'opère le dégagement des gaz qui proviennent de la décomposition. C'est M. Matteucci qui a le premier confirmé cette explication par des expériences directes faites avec de l'eau très-pure. Il s'est assuré que les polarités persistent sur les lames de platine très-longtemps, qu'on peut les détruire en chauffant ces lames au rouge, et qu'une seule lame suffit pour exciter le courant quand on l'emploie avec une autre qui n'a pas servi d'électrode; mais cependant, dans ce cas, la lame sur laquelle l'hydrogène s'est déposé, donne un effet plus prononcé que celle où le dépôt a été de l'oxygène.

Pour montrer qu'il y a effectivement une couche d'hydrogène adhérente à une lame qui a servi d'électrode négatif, et une d'oxygène à une lame qui a servi d'électrode positif, M. Matteucci introduit la première dans une petite cloche graduée remplie d'oxygène, et la seconde dans une cloche semblable remplie d'hydrogène; dans chacune des cloches il y a une diminution de volume qui ne peut provenir que de la combinaison de l'oxygène et de l'hydrogène contenus dans les deux cloches, respectivement avec l'hydrogène et l'oxygène restés adhérents aux lames. Dans une expérience, la diminution fut de $\frac{4}{10}$ de centimètre cube dans l'oxygène, et de $\frac{2}{10}$ de centimètre cube dans l'hydrogène. On peut se rappeler que j'ai obtenu un résultat semblable en renversant la direction du courant dans la décomposition électrolytique de l'eau acidulée, et en montrant que les quantités de gaz dégagées sont moindres qu'elles ne devraient l'être, quand on prend pour électrode négatif la lame qui a servi d'électrode positif, et réciproquement [1]. Du reste, M. Matteucci a réussi également dans ce cas, comme il l'avait fait pour le cas des dépôts alcalins et acides, à démontrer, par une expérience directe, que le courant est bien dû aux couches d'hydrogène et d'oxygène que détermine la décomposition électrolytique de l'eau. Il a placé dans ce but des lames de platine dans de l'hydrogène et dans de

[1] Voyez plus haut tome II, page 353.

l'oxygène très-purs ; puis, après les en avoir retirées et les avoir unies au fil d'un galvanomètre, il les a plongées dans de l'eau distillée et a obtenu des déviations qui ont été jusqu'à 90°. Le courant va toujours dans le liquide de la lame qui a été dans l'hydrogène à celle qui a été dans l'oxygène. Les couches de gaz obtenues de cette manière sont aussi adhérentes que celles que détermine la décomposition électrolytique ; il faut seulement laisser les lames dans le gaz environ dix minutes pour avoir le maximum d'effet. On peut aussi obtenir un courant en n'employant qu'une lame qui a été plongée dans l'hydrogène ou dans l'oxygène, et en l'unissant avec une autre qui n'a été mise en contact avec aucun gaz. Il est nécessaire de se servir dans ces expériences de lames de platine ou d'or, et de s'assurer, avant de leur donner la polarité secondaire, qu'elles ne produisent par elles-mêmes aucun courant.

M. Schoenbein, dans les nombreuses recherches qu'il a faites sur ce sujet, a remarqué que si l'on sépare en deux compartiments par une cloison poreuse, le vase dans lequel on décompose électrolytiquement de l'eau distillée, on obtient un courant très-prononcé en plongeant dans l'eau de chacun de ces compartiments une lame de platine qui n'a point servi d'électrode, et il s'est assuré que cette propriété appartient à l'eau du compartiment où s'est dégagé l'hydrogène, car elle subsiste quand on transporte cette eau dans un autre vase, où elle est en contact par l'intermédiaire d'une autre membrane avec de l'eau chimiquement pure. L'eau dans laquelle l'oxygène avait été dégagé ne possède point la même propriété. Celle-ci provient donc évidemment de l'hydrogène dissous dans l'eau ; et, en effet, il suffit pour la développer de faire dissoudre artificiellement de l'hydrogène dans de l'eau pure, sans avoir besoin d'employer pour cela la décomposition électrolytique. Il est indispensable pour réussir que la lame métallique qui plonge dans l'eau hydrogénée soit de platine ; celle qui plonge dans l'eau, soit oxygénée, soit pure, peut être indifféremment de platine, d'or, ou même d'argent : le courant marche toujours directement de l'eau où l'hydrogène est dissous à l'eau qui est en contact avec la première par l'in-

termédiaire de la cloison poreuse. M. Schoenbein a encore observé que l'eau dans laquelle on a fait dissoudre de l'oxygène soit directement, soit en y transmettant un courant dont l'électrode positif est en contact avec elle, est complétement inactive avec l'eau ordinaire, même dans le cas où le circuit est fermé par des lames de platine qui plongent dans les deux liquides. Cependant le platine et l'or qui ont servi d'électrodes positifs dans l'eau, acquièrent ainsi une polarité secondaire très-prononcée, polarité qui ne leur est point imprimée par leur simple contact avec l'oxygène, contrairement à ce qu'avait observé M. Matteucci. M. Schoenbein croit avec raison que cette polarité négative est communiquée au platine et à l'or par une couche d'ozone, soit oxygène ozoné, qui se dépose à leur surface, car il peut imprimer la même propriété à ces métaux en les plongeant simplement pendant quelques instants dans de l'air ozoné au moyen du phosphore. De l'eau qu'on a agitée dans un grand flacon rempli d'air ozoné donne, avec de l'eau pure et des lames de platine qui n'ont point été polarisées, un courant qui va de l'eau pure à l'eau ozonée. Le phénomène se passe comme dans le cas où l'eau tient en dissolution du chlore, du brome ou de l'iode; substances qui, comme l'ozone, impriment au platine et à l'or, quand elles forment un dépôt sur leur surface, une polarité négative. En général, comme M. Schoenbein l'a observé le premier, du platine plongé dans de l'eau qui tient en dissolution du chlore, du brome, de l'iode ou même de l'ozone, se comporte vis-à-vis du platine qui est plongé dans de l'eau pure séparée de la première par une simple cloison poreuse, comme un peroxyde (le peroxyde de plomb) qui formerait un couple avec une lame de platine dans de l'eau ordinaire ou légèrement acide. Il aurait semblé au premier abord que le platine plongé dans les dissolutions que nous venons de nommer, aurait dû au contraire se conduire comme un métal positif, à cause de l'action chimique qu'il doit éprouver de leur part. Mais le phénomène est tout différent; sous l'influence du platine, le chlore, le brome, l'iode, décomposent l'eau comme le fait un peroxyde, et il est facile de voir qu'alors la chaîne électrolytique s'établit

de telle façon que le courant marche dans le liquide de la lame de platine qui plonge dans l'eau pure à celle qui plonge dans la dissolution, tous les hydrogènes des molécules d'eau étant tournés du côté de celle-ci et les oxygènes du côté de l'autre. L'oxygène ozoné se conduit comme le chlore, le brome et l'iode, tandis qu'il n'en est pas de même de l'oxygène ordinaire, ce qui tient à ce que le premier décompose l'eau sous l'influence du platine et non le second. On trouve dans cette propriété générale l'explication du fait observé par plusieurs physiciens, que la dissolution du chlore, du brome et même de l'iode, facilite la production de l'électricité dans un couple qui plonge dans ces dissolutions, ainsi que la décomposition de l'eau dans laquelle on dissout ces substances. En effet, c'est une force chimique qui s'ajoute à celle du métal négatif du couple ou de l'électricité négative de la pile, pour séparer l'hydrogène de son oxygène dans chacune des molécules du filet d'eau, qui est déjà polarisé par le métal positif du couple ou par l'électricité positive de la pile.

M. Grove a analysé avec beaucoup de soin les phénomènes qui nous occupent et en a tiré les conséquences les plus remarquables. Il a le premier montré que l'action de l'hydrogène et de l'oxygène sur l'eau, sous l'influence du platine, pouvait donner naissance à un courant constant et non pas seulement à des courants d'une durée plus ou moins courte. Dans ce but, il a pris deux tubes fermés à leur partie supérieure et renfermant chacun une lame de platine pouvant communiquer extérieurement au moyen d'appendices g et g' (fig. 317). Il a rempli ces deux tubes d'eau acidulée, puis a introduit de l'hydrogène dans l'un, de l'oxygène dans l'autre, en ayant soin que la lame de platine fût plongée moitié dans le gaz, moitié dans le liquide; les deux tubes étant alors mis en communication, au moyen d'une dissolution d'acide sulfurique dans laquelle ils plongeaient par leur partie inférieure, on a obtenu un courant

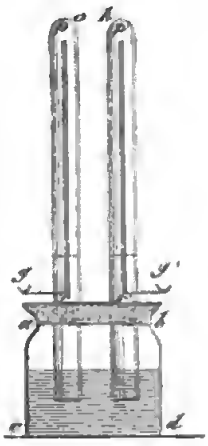


Fig. 317.

constant et prononcé en réunissant par le fil d'un galvanomètre les deux lames de platine. Il faut que ces lames aient été préalablement bien décapées; on peut remplir les tubes des gaz voulus en faisant passer à travers le liquide un courant voltaïque d'une force suffisante auquel les lames servent d'électrodes. Si l'on a soin de laisser subsister longtemps de suite la communication métallique entre les lames de platine, ce qui maintient le courant, on voit graduellement l'oxygène et l'hydrogène diminuer dans les deux tubes, dans la proportion de 1 volume d'oxygène pour 2 d'hydrogène.

M. Grove ayant reconnu que l'action ne peut avoir lieu qu'à l'endroit où le liquide, le gaz et le métal sont en contact, chercha à obtenir une surface d'action aussi grande que possible. Dans ce but, il employa des lames de platine platiné, c'est-à-dire recouvertes d'une couche mince pulvérulente de platine, suivant le procédé de M. Smee [1]. Les premières expériences furent faites avec des fils de platine au lieu de lames, et ayant réuni voltaïquement cinquante couples semblables, de façon que le fil plongé dans l'hydrogène de l'un communiquât avec le fil plongé dans l'oxygène de l'autre, on parvint à obtenir une pile dont les pôles faisaient diverger un électroscope à feuilles d'or; ces mêmes pôles, lorsqu'ils étaient terminés par des pointes de charbon, donnaient entre eux une étincelle visible en plein jour; la pile produisait une secousse qui pouvait être sentie par cinq personnes réunies ensemble, pouvait décomposer l'iodure de potassium, l'acide chlorhydrique, l'eau acidulée avec l'acide sulfurique, agissait sur l'aiguille aimantée, etc. Les effets étaient les mêmes, que la pile fut chargée par de l'oxygène et de l'hydrogène provenant de la décomposition électrolytique de l'eau, ou par de l'oxygène et de l'hydrogène préparés par des procédés purement chimiques. Cette nouvelle pile ou batterie fut nommée *pile* ou *batterie à gaz* par M. Grove qui lui donna différentes formes dont la der-

[1] Ce procédé consiste à se servir des lames de platine qu'on veut platiner, comme d'électrodes négatifs dans une dissolution de chlorure d'or; elles se recouvrent bientôt d'un dépôt de platine pur, mais à l'état d'une grande division.

nière, à laquelle il s'est arrêté, nous paraît la plus convenable. Voici sa description :

Chaque auge est formée (fig. 318) d'un flacon *a* en verre à trois embouchures semblable aux flacons de la fig. 310, qui nous ont servi dans la construction de la pile destinée à établir la loi des équivalents dans l'intérieur même de la pile. Un bouchon en verre *b* ferme l'embouchure du centre ; des tubes *o* et *h* s'ajustent exactement dans les deux autres ouvertures au moyen de bourrelets en verre qui font corps avec ces tubes et qui sont usés extérieurement à l'émeri comme le bouchon de l'ouverture ; chaque tube contient une lame de platine platiné qui est un peu moins longue que le tube, et qui se termine supérieurement par un fil de platine fort ; ce fil traverse le haut du tube dans lequel il est hermétiquement scellé, et porte un petit

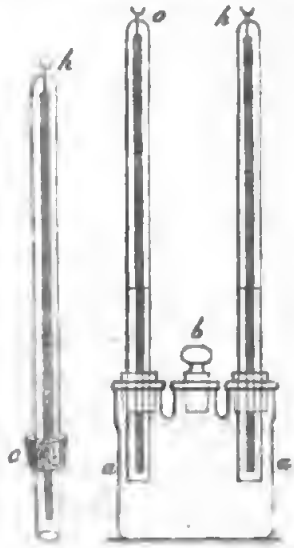


Fig. 318.

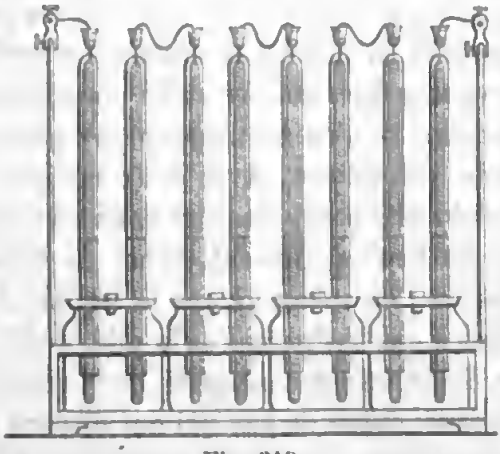


Fig. 319.

godet en cuivre qu'on remplit de mercure [1] qui sert à établir, au moyen de fils métalliques recourbés, la communication entre

[1] On peut avantageusement remplacer les godets par de petites pinces métalliques.

les couples successifs, comme on le voit dans la fig. 319. Pour introduire dans les tubes l'eau acidulée, on commence par en remplir complétement le flacon, puis on le retourne en ayant soin de retenir avec les doigts le bouchon du verre et les tubes; ceux-ci étant en bas se remplissent bientôt du liquide, surtout si on a soin de l'agiter un peu pour chasser l'air. Enfin on introduit les gaz dans chaque tube, soit au moyen d'un tube recourbé qui communique au récipient où est le gaz, soit, ce qui est plus commode, en opérant au moyen d'une pile ordinaire la décomposition de l'eau dans chaque flacon. Comme il ne faut que moitié moins d'oxygène que d'hydrogène, l'un des tubes est plus étroit que l'autre, et c'est dans celui-là qu'il faut avoir soin d'introduire l'oxygène. Du reste, les tubes sont gradués avec soin de manière à pouvoir mesurer les volumes gazeux. L'avantage de cette disposition de la pile à gaz est, d'abord, qu'on peut en plongeant le flacon dans la cuve pneumatique en détacher chaque tube pour mesurer et examiner le gaz qu'il renferme; c'est en outre que l'intérieur du flacon est parfaitement imperméable à l'air, et enfin qu'étant exclusivement composé de verre et de platine, il peut renfermer des liquides électrolytiques de toute espèce, même les plus corrosifs.

Un seul couple de la pile à gaz construit d'après la description que nous venons d'en donner suffit pour décomposer l'iodure de potassium; il n'en faut que quatre pour décomposer l'eau acidulée du voltamètre. Avec deux couples la décomposition s'opère assez vite pour produire dans une expérience, au bout de trente-six heures, 34 cent. cubes de mélange gazeux dans le voltamètre; en même temps le liquide a monté dans chacun des tubes à gaz hydrogène de la pile, de 24 cent. cubes, et dans chacun des tubes à gaz oxygène, de 11 cent. cubes, ce qui fait en tout 35 cent. cubes de gaz qui ont disparu dans chaque couple; quantité presque exactement équivalente à celle qui a été dégagée dans le voltamètre. Souvent il disparaît dans les couples un peu plus d'hydrogène que la quantité équivalente à celle de l'oxygène absorbé, ce qui tient à la combinaison qui s'opère sous l'influence du platine entre l'hydrogène qui est dans le tube et l'oxygène dissous dans l'eau. Cette espèce d'action locale

a lieu également que le couple fasse partie du circuit voltaïque ou ne soit pas en activité.

Pour démontrer l'exactitude de cette explication, il faut chasser de la dissolution acide, autant que possible, tout l'air qui y est dissous, et pour cela il suffit, après avoir fait bien bouillir cette dissolution, de placer dans le vide l'auge et les deux tubes qui la contiennent, pendant vingt-quatre à quarante-huit heures. On remplit ensuite, au moyen d'un courant voltaïque, l'un des tubes d'oxygène, et l'autre d'hydrogène; puis, après avoir laissé l'appareil, pendant deux ou trois semaines, sans le toucher, on trouve que le volume d'hydrogène a encore un peu diminué, mais bien moins que quand on n'a pas chassé l'air; le volume de l'oxygène n'a pas changé. On prend, par contre, une autre auge, et, loin d'en chasser l'air, on y met aussi peu de liquide que possible, seulement ce qu'il en faut pour que les tubes puissent tremper dans la couche liquide par leurs extrémités inférieures; le reste du flacon est rempli d'air atmosphérique, mais cet air ne communique point avec l'air extérieur, le flacon étant hermétiquement fermé. Au bout de douze à quinze jours, on peut constater que l'hydrogène a considérablement diminué : dans une expérience il avait diminué de 32 centimètres cubes ; et si on introduit dans l'auge, au moment où elle s'ouvre, une allumette enflammée, on la voit s'éteindre immédiatement, parce qu'il ne reste que de l'azote dans l'air de la partie supérieure du flacon, et que l'oxygène de cet air a été graduellement absorbé par le liquide pour venir se combiner avec l'hydrogène. Ainsi l'hydrogène, sous l'influence du platine, se combine avec l'oxygène dissous dans le liquide avec lequel cet hydrogène et ce platine sont en contact, et le liquide, reprenant de l'oxygène à mesure que le sien disparaît, peut ainsi l'enlever graduellement presque en entier à de l'air atmosphérique qui est en contact avec lui[1].

[1] M. Grove a essayé d'appliquer cette propriété à la détermination eudiométrique de la quantité d'oxygène que renferme l'air. Dans ce but il place dans une auge étroite, où il y a de l'acide sulfurique étendu, deux tubes étroits de 15 à 20 centimètres de longueur remplis d'air atmosphérique ; ces tubes portent une graduation. On place dans l'un des tubes une lame de platine platinée

M. Grove a réussi a obtenir, par cette action seule, un courant suffisamment énergique, en supprimant l'oxygène dans la pile à gaz et en le remplaçant simplement par de l'eau acidulée; l'effet en est d'abord presque aussi fort que celui de la pile où sont également les deux gaz, mais l'action diminue rapidement, tandis qu'elle est constante dans l'autre.

M. Schoenbein attribue le dégagement de l'électricité dans la pile à gaz de Grove à l'hydrogène, et par conséquent à l'action chimique qui a lieu entre lui et l'eau acidulée; il estime que l'oxygène en contact avec le platine n'a pour effet que de dépolariser ces lames sur lesquelles l'action voltaïque amène constamment, pendant que la pile est en activité, de l'hydrogène, qui alors, au lieu de rester en couche mince sur le métal, est enlevé par l'oxygène qui s'y trouve, en se combinant avec lui. Il doit nécessairement en résulter que l'effet de la pile n'est plus affaibli comme lorsque l'hydrogène demeure adhérent au platine. Mais, tout en admettant la réalité de l'effet signalé par M. Schoenbein, ne peut-on pas dire que la combinaison chimique de l'oxygène avec l'hydrogène naissant en même temps qu'elle dépolarise le platine, contribue à la production de l'électricité comme le peroxyde de plomb qui recouvre le platine dans les couples zinc et platine, ainsi que nous l'avons vu plus haut. Du reste, la présence de l'oxygène est nécessaire à la production du courant. Ainsi M. Grove s'est assuré que, dans la pile où on le remplace par la dissolution d'acide sulfurique, il n'y a pas d'effet produit si les couples étant placés dans une atmosphère d'azote, il ne peut y avoir d'oxygène dissous dans le liquide. Il a d'ailleurs montré qu'on peut former également une pile active avec l'un ou l'autre des deux éléments gazeux, soit en remplaçant l'oxygène par un

qui est mise en communication métallique avec une lame semblable placée dans un tube plein de gaz hydrogène qui plonge dans le même vase; l'autre tube plein d'air sert seulement à déterminer combien il s'en est dissous pendant la durée de l'expérience. Dans une expérience qui avait duré deux jours, le liquide avait monté de 22 divisions dans le premier tube, de 1 dans le second, ce qui donne 21 pour 100 pour la quantité d'oxygène qui se trouve dans une certaine quantité d'air. Au bout de plusieurs jours le résultat n'avait pas changé.

électrolyte qui ait beaucoup d'affinité pour l'hydrogène, tel que l'acide nitrique; soit en remplaçant l'hydrogène par un électrolyte qui ait beaucoup d'affinité pour l'oxygène, tel que le protosulfate de fer. Il est vrai que la pile à acide nitrique et à hydrogène est plus forte, et surtout plus constante, que celle à oxygène et à protosulfate de fer; mais cela tient à la nature de l'action chimique et à ce qu'une grande partie du protosulfate passe à l'état de sulfate de peroxyde par l'effet direct de l'oxygène de l'air; ce qui diminue l'action de l'oxygène de la pile.

Nous pouvons donc regarder les deux gaz comme contribuant directement l'un et l'autre à l'effet voltaïque dans la pile à gaz. Quant à la théorie de cette pile, elle est exactement la même que celle que nous avons exposée pour les piles dans lesquelles les métaux sont les éléments actifs. L'hydrogène adhérent à la surface du platine dans la ligne de contact entre cette surface et le liquide, polarise les filets de ce liquide, de façon que les oxygènes négatifs de toutes leurs particules sont tournés de son côté et les hydrogènes positifs de l'autre; l'oxygène adhérent à la surface du second platine produit sur les mêmes filets un effet analogue, qui s'ajoute au premier puisqu'il agit dans le même sens. Quand on unit métalliquement les deux lames de platine, l'électricité négative libre de la lame qui est en contact avec l'hydrogène se réunit avec la positive de celle qui est en contact avec l'oxygène; la décomposition et la recomposition des molécules successives des filets s'opèrent, et en même temps que l'oxygène de l'une des molécules extrêmes se combine avec l'hydrogène adhérent au platine, l'hydrogène de l'autre molécule extrême se combine avec l'oxygène adhérent à l'autre platine. Ajoutons, à l'appui de la théorie que nous venons d'exposer, que M. Grove a démontré par des expériences directes que la partie active dans la pile à gaz ce sont les portions du platine, qui dans chaque tube affleurent le liquide à mesure qu'il s'élève dans le tube; et c'est en effet les seules où il puisse y avoir contact à la fois entre le liquide et le gaz adhérent au platine [1].

[1] Cependant il résulte d'une observation de M. Jacobi, confirmée par M. Pog-

Cette affinité à distance, comme M. Faraday l'a si bien caractérisée, qui s'exerce par l'intermédiaire des molécules liquides, interposées d'une part, et de l'arc métallique qui les unit d'autre part, entre l'hydrogène et l'oxygène qui sont séparés par le liquide, peut avoir lieu à des distances infiniment petites et constituer, comme dans les couples voltaïques ordinaires, l'action locale; c'est ce qui arrive quand le liquide en contact avec l'hydrogène renferme de l'oxygène dissous. Les molécules d'eau polarisées par l'hydrogène qui adhère au platine dans la portion où ce platine affleure la surface du liquide, trouvent de l'oxygène sur le platine au-dessous de cette surface; voilà aussitôt un petit circuit moléculaire formé. Ce n'est donc point l'oxygène dissous qui se combine directement avec l'hydrogène libre; mais cet oxygène sert à former un circuit actif analogue à celui qui a lieu dans le couple ordinaire, avec la seule différence qu'il est moléculaire et que l'arc métallique qui entre dans sa formation n'est qu'une petite portion de la surface du platine placé dans le tube à hydrogène; c'est de même l'oxygène, adhérent à la lame de platine placée dans la dissolution d'acide sulfurique, qui sert à la production du courant, quand on remplace par cette dissolution l'oxygène des tubes. Cet oxygène est inutile, lorsqu'au lieu d'une dissolution d'acide sulfurique on prend de l'acide nitrique qui lâche si facilement son oxygène, que son emploi est préférable pour la force de la pile, à celui de l'oxygène lui-même. En effet, trois couples suffisent dans ce cas pour décomposer l'eau, tandis qu'il en faut quatre avec la pile à gaz oxygène. Le peroxyde de plomb produit un

gendorff, que la combinaison de l'oxygène et de l'hydrogène sous l'influence du platine peut avoir lieu quand même ces gaz ne sont pas immédiatement en contact avec le liquide, et en sont séparés par le liquide électrolytique. Ainsi M. Poggendorff ayant dégagé 56 centimètres cubes de mélange gazeux dans un voltamètre à lames nouvellement platinées, en ayant pris soin que les lames restassent toujours au-dessous du niveau du liquide, il observa que la réabsorption des gaz se faisait avec une vitesse immense, tellement que dans quelques instants plusieurs centimètres cubes avaient disparu; la réabsorption se ralentissait ensuite, mais elle finissait cependant par s'opérer entièrement. Il résulte de ce fait que la combinaison ne se fait pas exclusivement à la place que M. Grove lui a assignée; circonstance du reste peu importante.

Digitized by Google

effet encore plus grand; un seul couple, hydrogène et platine recouvert de peroxyde de plomb, décompose facilement l'eau. Ajoutons que dans la pile à gaz, l'oxygène au lieu d'être simplement adhérent, est très-probablement combiné avec le platine de manière à former un oxyde facilement réductible; c'est ce qui résulte de l'examen de toutes les circonstances qui facilitent l'action de l'appareil telles en particulier que l'état pulvérulent du platine, et ce qui est d'ailleurs d'accord avec les faits que nous avons déjà rapportés en faveur de l'oxydation du platine [1].

La pile à gaz de Grove nous présente un exemple frappant, et je dirai piquant, de la loi des équivalents de Faraday. Nous voyons la combinaison d'un équivalent d'hydrogène et d'un équivalent d'oxygène produire un courant capable de décomposer un équivalent d'eau, c'est-à-dire une quantité d'eau précisément égale à celle dont la formation a donné naissance à ce courant. Au premier abord on ne conçoit pas que la force que produit la formation de l'eau soit suffisante pour surmonter la force par laquelle ses molécules constituantes sont déjà unies. Il est facile de répondre à cette objection en ce qui concerne la décomposition de l'eau dans le voltamètre, car une décomposition ne peut avoir lieu qu'autant qu'il y a plus d'un couple, au moins quatre, et que par conséquent nous avons quadruplé, conformément à la théorie de la pile, la force décomposante. S'il s'agit d'un seul couple dont les lames de platine sont unies métalliquement, l'objection est plus spécieuse et elle a été proposée par M. Grove lui-même. Cependant il faut remarquer que chaque molécule des filets d'eau interposés entre les deux lames du couple, est soumise à deux forces décomposantes qui agissent dans le même sens, l'une qui tire l'oxygène du côté de la lame de platine où est l'hydrogène, l'autre qui tire l'hydrogène du côté de la lame de platine où est l'oxygène. Ce que ne peut pas faire l'une de ces actions quand elle est seule, ainsi que le prouve l'expérience [2], les deux réunies

[1] Tome II, page 354.

[2] En effet on n'obtient jamais de courant, ni par conséquent de décomposition

l'opèrent, car si on prend l'une des molécules d'eau dans le filet, il est facile de voir que l'affinité de son hydrogène pour son oxygène est combattue à la fois par la force avec laquelle son hydrogène est tiré par l'oxygène de la molécule suivante et par celle avec laquelle son oxygène est tiré par l'hydrogène de la molécule précédente, et ainsi de suite pour toutes les autres.

M. Grove a fait un très-grand nombre d'expériences sur la pile à gaz en remplaçant l'oxygène et l'hydrogène, soit séparément, soit simultanément, par d'autres substances gazeuses. Les expériences ont toutes donné des résultats parfaitement conformes à la théorie que nous avons exposée. Ainsi, l'azote mis à la place, soit de l'oxygène, soit de l'hydrogène, n'a produit aucun effet. Le protoxyde d'azote associé avec l'oxygène n'en a point produit non plus de sensible; il n'en a pas été de même du deutoxyde qui donne avec l'oxygène un léger courant, et diminue quand le circuit est longtemps fermé, dans la proportion de 4 volumes de deutoxyde pour 1 d'oxygène. Associés avec l'hydrogène les deux gaz produisent un courant prononcé; le volume du deutoxyde diminue de moitié, et le résidu gazeux est de l'azote; le volume augmente ensuite graduellement par l'addition de l'hydrogène; le protoxyde ne subit pas de changement de volume, mais son changement chimique est accusé par l'absorption de l'hydrogène qui forme le couple avec lui. Le gaz oléfiant semble donner un courant continu avec l'oxygène, mais très-faible. Les gaz qui paraissent être les plus efficaces sont d'une part l'oxygène et le chlore, d'autre part l'hydrogène et l'oxyde de carbone. Le chlore et l'hydrogène forment une combinaison si forte, que deux couples suffisent pour décomposer l'eau dans le voltamètre; le chlore et l'oxyde de carbone produisent également des effets considérables, quoique moins énergiques que le chlore et l'hydrogène. Mais l'extrême solubilité du chlore rend son emploi peu satisfaisant

de l'électrolyte avec un seul couple quand on supprime l'hydrogène en ne laissant que l'oxygène, ou quand, en ne laissant que l'hydrogène, on a soin de chasser tout l'oxygène qui pouvait se trouver dissous dans le liquide.

pour la production d'un courant de quelque durée. L'oxygène et l'oxyde de carbone sont des quatre combinaisons qu'on peut faire avec les quatre gaz indiqués plus haut, celle qui a le moins d'énergie; cependant une pile de dix couples chargée ainsi décompose l'iodure de potassium et un peu d'eau du voltamètre.

M. Grove, ayant constaté que l'azote était inactif, essaya de s'en servir comme dissolvant de quelques corps, tels que le phosphore et le soufre. Dans ce but, après avoir rempli d'azote l'un des tubes du couple et l'autre d'oxygène, il introduisait le phosphore ou le soufre dans l'azote au moyen d'une tige terminée par une petite capsule, dans laquelle il logeait la substance. Le couple ainsi formé (fig. 320) donnait un fort courant; seulement quand le corps introduit était du soufre, il fallait élever la température, ce qu'on faisait au moyen d'un simple anneau de fer muni d'un manche qu'on passait par-dessus le tube contenant le soufre et l'azote, après l'avoir assez fortement chauffé pour amener le soufre à l'état liquide. Dans ces expériences ce sont les vapeurs de phosphore et celles de soufre qui, logées dans l'azote inactif, jouent le rôle que jouait l'hydrogène dans la pile à gaz et se combinent à distance, sous l'influence du platine, comme le faisait ce gaz, par l'intermédiaire du liquide électrolytique, avec l'oxygène enfermé dans l'autre tube. Des piles de dix couples montées avec oxygène et vapeur de phosphore décomposent l'eau; et on trouve, en pesant le phosphore avant et après l'expérience qu'on fait durer d'autant plus longtemps que la température extérieure est plus basse, et en mesurant de même le volume de l'oxygène, que ce gaz et le phosphore ont diminué à peu près dans un rapport égal à celui de leurs équivalents, et à l'équivalent de l'eau décomposée par le courant.

Fig. 320.

Il est donc maintenant bien établi, par les recherches de M. Grove, que l'action des fluides élastiques, dans leur contact

avec un liquide électrolytique, peut, sous l'influence du platine, développer un courant électrique, et que cette action électro-chimique est soumise aux mêmes lois que les autres, et en particulier à la loi des équivalents. Quant à la force de cette action, elle dépend non-seulement de la nature du gaz et du liquide électrolytique, mais aussi de celle du métal dont la présence détermine l'action chimique. Le même métal varie à cet égard avec la nature de sa surface. Ainsi M. Poggendorff a remarqué que des lames de platine bien polies peuvent acquérir un maximum de polarisation supérieur à celui des lames platinées, mais que le maximum est plus vite obtenu avec ces dernières, et qu'il varie moins par le changement de la force du courant qui produit la polarisation, que celui des lames polies. En effet, le courant produit par les couches de gaz dont sont recouvertes les surfaces des électrodes qui ont servi à la décomposition, et qui ont acquis ainsi les polarités secondaires, varie avec la force du courant qui a produit ces polarités. C'est ce que nous verrons dans le paragraphe que nous consacrerons à la mesure des forces électromotrices, en exposant comment on est parvenu à déterminer celle des gaz dans les diverses conditions où ils peuvent se trouver, de la même manière qu'on a déterminé celle des solides; nous verrons également l'importance que présente cette détermination dans l'appréciation de la force électromotrice des piles, et dans celle de l'influence qu'exerce sur cette force l'interposition dans les piles de couples inactifs; car les polarités secondaires qu'acquièrent les métaux qui ont fait partie d'un circuit sont presque toujours dues à des couches gazeuses déposées à leur surface par le courant, et par conséquent leur influence, qui tend à produire un effet contraire à celui du courant qui leur a donné naissance, ne peut être exactement évaluée qu'autant qu'on connaît la force électromotrice des gaz[1].

[1] Il peut arriver que dans certains gaz, la puissance d'une couche de gaz sur la surface d'un métal, au lieu de diminuer augmente la force électromotrice de ce métal; ainsi, comme l'a observé M. Buff, quand on a fait déposer sur la surface du zinc une couche mince d'hydrogène, en s'en servant comme d'électrode négatif dans la décomposition de l'eau, cette lame devient fortement positive par

Toutefois nous pouvons dès à présent nous rendre compte de l'influence de certaines causes sur la diminution de la résistance que présentent à la transmission du courant, les électrodes qui servent à la décomposition de l'eau acidulée dans les voltamètres. Ainsi, lorsqu'on décompose l'eau avec un seul couple à acide nitrique, et même à peroxyde de plomb, l'action est bien vite arrêtée ou extrêmement affaiblie par l'effet de la polarisation des électrodes qui exercent une force électromotrice opposée à celle du couple : or il suffit, pour lui redonner toute sa vivacité primitive, de changer le sens du courant dans le voltamètre, parce qu'alors on fait agir les deux forces électromotrices dans le même sens. Mais bientôt la nouvelle polarisation qu'acquièrent les électrodes affaiblit de nouveau le courant, de sorte que, pour lui rendre de nouveau son pouvoir, il faut encore changer sa direction. En déterminant donc ces alternatives dans la direction du courant, on obtient facilement une décomposition assez forte de l'eau du voltamètre au moyen d'un seul couple. On peut se servir d'un commutateur mu par l'action elle-même, en lui imprimant le mouvement nécessaire au moyen d'un électro-aimant placé dans le circuit, et qui est disposé de façon que lorsque sa puissance diminue par l'affaiblissement même du courant, son armure, en se détachant, fasse marcher le commutateur. M. Grove a trouvé de l'avantage à interposer entre le couple et le voltamètre deux larges lames de platine plongeant dans de l'acide sulfurique étendu qui, sans dégager de gaz visible, sont polarisées par le courant ; ce sont sur ces lames qu'agit le commutateur, de façon que c'est leur force électromotrice qui s'ajoute à celle du courant, ce qui fait que celui-ci va toujours dans le même sens dans le voltamètre proprement dit. Trois expériences faites avec un seul couple à acide nitrique ont donné dans le même temps au voltamètre :

Sans lames de platine interposées. . .	2cc, 4
Avec lames interposées.	1cc, 6
Avec lames et commutateur.	3cc, 7

rapport à une autre semblable qui n'a pas été placée dans les mêmes conditions ; ce qu'on constate soit par la charge qu'elles donnent au condensateur, soit par le sens du courant qu'elles produisent en formant un couple.

L'augmentation d'effet dû à ce que M. Grove nomme la *réaction voltaïque* est donc bien sensible.

Parmi les causes qui diminuent la résistance au passage dans un voltamètre, nous avions signalé[1] le réchauffement et l'ébranlement des électrodes, et plus particulièrement de l'électrode négatif. M. Beetz a réussi à démontrer que l'effet de ces deux actions tient à ce qu'elles diminuent ou détruisent la polarisation des électrodes. Il a remarqué que lorsque le courant est faible, la destruction ou diminution de polarisation par le réchauffement est, comme je l'avais déjà observé, plus sensible pour l'électrode négatif, mais qu'elle devient la même pour tous les deux quand le courant est fort, ce qui tient à ce que la force électromotrice de l'électrode polarisé par l'hydrogène est très-supérieure à celle de l'électrode polarisé par l'oxygène; d'où résulte que la différence entre eux, sous ce rapport, doit être bien plus sensible lorsque le courant, et par conséquent les deux polarisations, sont faibles. Du reste, l'influence de la température sur la polarisation des électrodes doit varier non-seulement avec la force du courant, mais avec la nature des électrodes eux-mêmes et du liquide électrolytique placé entre eux.

Il nous reste encore, avant de terminer ce paragraphe, à traiter quelques points qui s'y rattachent. Nous devons d'abord faire mention d'une nouvelle classe de couples gazeux découverte par M. Gaugain, en faisant des recherches sur la thermo-électricité, et que nous avons déjà signalée en passant[2]. Le plus simple de ces couples est celui qu'on obtient en mettant en présence, à une température élevée, deux tubes en verre qui contiennent, l'un de l'air, l'autre de la vapeur d'alcool. M. Gaugain a réussi à produire avec ces couples, qu'on peut disposer bout à bout de manière à en former une véritable pile, tous les effets des couples hydro-électriques ordinaires. Il a reconnu que la nature des fils métalliques qui servent à mettre les tubes de verre en communication, soit avec

[1] Tome II, pages 16 et 348.
[2] Tome II, page 362.

le sol, soit avec le condensateur, n'influe point sur les résultats, et que ces fils ne jouent par conséquent que le rôle de simples conducteurs. En formant une série de couples gazeux avec l'air, l'oxygène, l'azote, l'acide carbonique, l'hydrogène, les vapeurs d'eau, d'alcool ou d'éther, M. Gaugain n'a trouvé d'actifs que ceux dans lesquels l'un des deux éléments était l'air ou l'oxygène, et l'autre l'un des fluides élastiques différents de ces deux gaz; il avait soin de boucher le tube de verre aux deux bouts quand il le remplissait d'un fluide élastique autre que l'air ou l'une des vapeurs. Il est disposé à conclure de ses recherches que l'électricité provient uniquement d'une action qui s'exerce entre l'oxygène et le verre qui est amené à l'état de fusion, et que le second fluide élastique ne joue que le rôle d'un simple conducteur. Nous serions plutôt disposés à croire, tout en admettant l'action de l'oxygène sur le verre fondu, que les phénomènes observés par M. Gaugain rentrent tout à fait dans ceux de la pile à gaz de Grove, avec cette différence que le liquide électrolytique qui sépare les deux fluides élastiques est du verre fondu, au lieu d'une dissolution d'acide sulfurique; or, que le verre fondu puisse servir de liquide électrolytique, c'est ce que démontrent des expériences récentes de Buff, qui non-seulement en a obtenu la décomposition par un courant voltaïque, mais a même réussi à l'employer en cette qualité dans la construction d'une pile.

Un autre point dont nous avons encore à parler, c'est la propriété découverte par M. E. Becquerel, que possède l'hydrogène d'opérer, sous l'influence du platine, la réduction d'une dissolution de chlorure d'or, que ni l'hydrogène seul, ni le platine seul ne sont capables de réduire.

On place une petite éprouvette remplie de gaz hydrogène, de 2 à 3 millimètres de diamètre, dans un vase contenant une dissolution de chlorure d'or, de manière qu'elle y plonge par son extrémité ouverte. Au bout de quelques jours, si la température n'a pas sensiblement varié, le niveau du chlorure d'or dans l'intérieur du tube est resté à peu près le même; mais si l'on introduit un fil de platine au-dessous de l'éprouvette, de manière que ce fil se trouve en partie plongé dans le

gaz hydrogène, en partie plongé par son autre extrémité dans le chlorure d'or, on voit alors le gaz diminuer de volume à l'intérieur, et même au bout d'un certain temps disparaître complétement si le fil de platine va jusqu'au haut du tube. En même temps que l'hydrogène disparaît, de l'or métallique se précipite sur la portion du fil de platine qui plonge dans la dissolution métallique. Cette action se manifeste dans des tubes fermés, et dans lesquels il n'y a pas trace d'air atmosphérique; l'effet n'est point dû à l'action du liquide sur le platine, puisque le platine seul ne l'exerce point et qu'il ne reste pas trace de platine dans la dissolution après l'opération. Si l'on remplace le fil de platine par un fil d'or, la réduction du chlorure dans l'hydrogène n'a plus lieu. Cet effet est évidemment le résultat d'une action locale, c'est-à-dire d'un courant moléculaire qui part des particules d'hydrogène adhérentes à la surface du platine, à l'endroit où ce métal touche la surface de la dissolution de chlorure d'or, traverse une petite couche de cette dissolution, vient aboutir à la partie du platine qui y étant plongée n'est plus recouverte d'hydrogène, et y dépose l'or. L'affinité de l'hydrogène pour le chlore est ici suffisante à elle seule pour déterminer la formation du circuit voltaïque, et par conséquent l'électrolysation de la dissolution.

Enfin il nous reste à parler d'un phénomène que nous avons déjà mentionné en passant [1], et qui consiste dans cet état particulier que peut prendre le fer, en vertu duquel il devient inattaquable par les acides et peut jouer dans bien des cas le rôle du platine; état que M. Schoenbein, qui en a fait une étude toute particulière, a désigné sous le nom de *passivité*, en appellant *fer passif* le fer qui le possède.

Déjà Bergmann et Kirwan avaient remarqué que le fer employé pour précipiter l'argent de sa dissolution perd cette propriété au bout d'un certain temps; Keir montra que le fer employé ne peut plus précipiter l'argent, non-seulement de la dissolution où il a été d'abord plongé, mais d'aucune autre. Braconnot ayant remarqué que l'acide nitrique concentré n'at-

[1] Tome II, page 362.

taque pas le fer, Herschell examina de près ce sujet; il observa que le fer doux et décapé, plongé dans l'acide nitrique de 1,40, commence par brunir; puis qu'il se produit une effervescence pendant laquelle le liquide devient rougeâtre; toute action cesse bientôt et le fer a acquis la propriété de n'être plus attaqué; une légère friction ne lui enlève pas cette propriété, mais il la perd, si on le frotte trop fortement; il la perd également si on le touche dans un liquide électrolytique avec un métal oxydable; le fer, dans cet état, peut résister à l'action d'un acide très-fort. Mais de tous les physiciens, M. Schoenbein est celui qui a fait l'étude la plus détaillée de ce sujet; aussi ce sont ses travaux qui nous dirigeront essentiellement.

Lorsqu'on chauffe jusqu'au rouge l'une des extrémités d'un fil de fer, et qu'après son refroidissement on le plonge dans de l'acide nitrique de 1,35 de densité, cette extrémité n'éprouve aucune action de la part de l'acide, tandis que le même acide agit vivement sur l'extrémité du fil de fer non chauffée. Un fil de fer passif ou inactif peut rendre passif un qui ne l'est pas. Il suffit pour cela de les placer dans l'acide nitrique de 1,35 de densité, après les avoir mis en contact, en ayant soin d'introduire le premier le fil passif : les deux fils n'éprouvent alors également aucune action chimique; il en est de même quand on les sépare. On peut même rendre passif un fil de fer qui déjà éprouve une vive action dans l'acide nitrique, en plongeant dans le circuit acide un fil de fer déjà passif, et en mettant en contact les deux fils par celles de leurs extrémités qui sont en dehors du liquide. Le platine, le charbon et tout métal non oxydable peuvent, aussi bien que du fer déjà passif, donner par leur contact la passivité à un fil de fer qui ne la possède pas. Un couple de fer et platine entièrement plongé dans l'acide nitrique ne donne aucun effet quand on chauffe graduellement l'acide, sauf lorsque l'acide commence à entrer en ébullition; le fer alors est attaqué, et ne tarde pas à être dissous.

Le fer passif peut rester très-longtemps, trente jours et plus, dans de l'acide nitrique, sans perdre sa propriété de n'être pas attaqué; il la conserve quand on le retire de l'acide, lors

même qu'on l'expose à l'air ou qu'on le plonge dans de l'eau pure ou dans l'ammoniaque; mais dès qu'on frotte sa surface, il redevient actif.

Un fil de fer passif jouit de toutes les propriétés d'un fil de platine; ainsi il peut servir d'électrode positif à une pile dans une dissolution acide quelconque, aussi bien sulfurique que nitrique, et l'oxygène s'y dégage dans la proportion voulue, pendant que le dégagement d'hydrogène a lieu à l'électrode négatif, qui est de platine. Ainsi encore, de même que le platine, il ne précipite plus le cuivre et les métaux oxydables de leurs dissolutions respectives, propriété sur laquelle nous reviendrons dans le chapitre de la sixième partie, qui sera consacré aux applications chimiques de l'électricité. Quand la pile est une pile simple composée d'un seul couple, si l'on emploie un fil de fer passif comme son électrode positif, tandis qu'un fil de platine est son électrode négatif, il n'y a aucune décomposition en plongeant les deux fils dans une dissolution d'acide sulfurique, tandis qu'il y a un fort dégagement d'hydrogène autour du fil de platine quand on prend pour l'autre électrode du fer ordinaire ou du métal oxydable. On peut également produire momentanément ce dégagement d'hydrogène en mettant un instant en contact dans le liquide, le fer passif qui forme le couple fer et platine avec un métal oxydable, tel que du zinc, de l'étain, du cuivre ou même de l'argent; mais le dégagement de gaz qui a lieu ensuite sur le platine ne dure que peu de secondes.

On peut encore rendre passif un fil de fer en s'en servant dans de l'eau acidulée avec l'acide sulfurique, comme électrode positif d'un fort courant produit par un seul couple, et dont l'électrode négatif est un fil de platine. La décomposition de l'eau n'a pas lieu d'une manière sensible; mais si l'on touche un instant l'électrode de fer avec celui de platine dans le liquide même, la décomposition a lieu vivement dès qu'on les sépare l'un de l'autre, pour cesser un instant après. On produit le même effet en touchant le fer avec un métal oxydable dans le même liquide. Mais le fait le plus curieux est que si on réunit, extérieurement au liquide, les deux fils qui servent d'élec-

trodes par un fil de cuivre, on obtient encore un dégagement d'hydrogène très-momentané, comme le précédent, au moment où l'on enlève le fil de cuivre qui unissait les deux électrodes. Le fil de cuivre ne doit avoir que 7 à 8 centimètres de longueur et que 1 à 1 ½ millimètre de diamètre. Quand il est plus long ou plus mince, on obtient un dégagement d'hydrogène pendant le temps même où l'on s'en sert pour réunir les électrodes, et ce dégagement augmente à mesure qu'on allonge le fil jusqu'à ce qu'il ait un peu plus de 5 mètres de longueur. Au moment où l'on enlève le fil de cuivre qui établissait la communication entre les électrodes, le dégagement d'hydrogène devient beaucoup plus vif qu'il n'était pendant que la communication existait, mais il ne dure pas longtemps, et la décomposition s'arrête. Lorsque le fil de cuivre est excessivement long, de telle façon que probablement il ne transmet plus qu'une proportion très-minime du courant, les choses se passent comme si les électrodes n'étaient pas unis par une communication conductrice.

Tous ces effets, et bien d'autres dans les détails desquels il nous est impossible d'entrer, et qui ont été, pour le plus grand nombre, observés par M. Schoenbein, tiennent évidemment à la propriété que possède le fer de se recouvrir d'une pellicule d'oxyde qui le rend inattaquable par certains acides. Ils rentrent ainsi dans les phénomènes des polarités secondaires, qui sont dus également à des dépôts opérés sur la surface des métaux. Faraday, qui a émis le premier cette opinion, remarque qu'en effet toutes les circonstances qui sont propres à rendre le fer passif sont celles qui doivent déterminer la formation de cette couche superficielle d'oxyde; telles sont son réchauffement, sa combinaison voltaïque dans un liquide électrolytique avec un métal non oxydable. Il paraîtrait que cette couche d'oxyde ne peut pas former de sels avec les acides, et par conséquent n'a pas de tendance à se combiner avec eux, ce qui expliquerait pourquoi ils n'attaquent pas le fer qui en est recouvert, lequel se conduit soit chimiquement, soit voltaïquement, comme du platine. Ainsi nous avons vu qu'on ne peut décomposer l'eau acidulée avec le courant d'un simple couple ordi-

naire, si les deux électrodes sont en platine; il faut pour cela que le positif soit attaquable par le liquide électrolytique. Or le fil de fer passif n'étant pas attaquable, la décomposition n'a pas lieu s'il sert d'électrode positif. Mais si on unit voltaïquement ce fer dans le liquide avec un métal oxydable tel que le zinc, on détermine sur sa surface un dégagement d'hydrogène qui doit le désoxyder, et par conséquent lui rendre son activité chimique ordinaire. Il est facile d'expliquer de la même manière l'expérience curieuse de M. Schoenbein que nous avons rapportée plus haut. Quand le fort courant a traversé la solution acide au moyen de deux électrodes, l'un le négatif en platine, l'autre le positif en fer, celui-ci est devenu passif par le premier dégagement d'oxygène qui a eu lieu à sa surface, et la décomposition s'est arrêtée; on a alors réuni par un fil de cuivre gros et court, c'est-à-dire par un très-bon conducteur, les deux électrodes; ce fil a servi à la fois à conduire le courant et à former un couple entre les deux électrodes; ce couple formé a détruit la passivité du fer, et l'eau a été décomposée; mais quand on supprime le conducteur, le courant recommence à passer entre les deux électrodes, l'eau est décomposée au premier moment, puis le fer redevient passif, etc. Si le fil de cuivre qui réunit les électrodes est trop long, le phénomène n'a plus lieu, parce que le fil devient trop mauvais conducteur, soit pour dériver le courant qui continue à passer en grande partie entre les électrodes, soit pour permettre à ceux-ci de former un couple suffisamment actif, vu l'imparfaite communication qu'il établit entre eux; ce qui prouve que cette influence de la longueur ne tient qu'à la diminution dans la conductibilité du fil qu'elle occasionne, c'est qu'on obtient le même résultat en faisant usage d'un fil court et mince d'un métal peu conducteur, tel que le fer ou le platine.

On se demandera peut-être comment, en formant un couple avec le fer et le platine qui ont servi d'électrodes, on peut rendre au fer son activité comme on le fait en le mettant en contact dans le liquide avec un métal oxydable; cela tient à ce que le platine joue le même rôle que jouerait le zinc ou tout autre métal oxydable par l'effet de la polarisation que lui a impri-

mée le même courant qui a rendu le fer passif. Ce courant, en portant sur le fer l'oxygène qui a déterminé la formation de la couche d'oxyde à laquelle est due la passivité, a développé sur le platine une couche équivalente d'hydrogène, d'où résulte que ce métal, en contact ensuite avec le fer positif, devient l'élément positif du couple qui dégage, en décomposant l'eau sur le platine, de l'oxygène qui le dépolarise, et sur le fer de l'hydrogène qui désoxyde la surface de ce métal et lui rend ainsi son activité chimique.

M. Martens avait attribué la passivité du fer à une modification physique que ce métal aurait éprouvée, de nature à changer ses rapports voltaïques ; M. Schoenbein, tout en estimant que cette modification consiste uniquement dans une altération imprimée au fer en ce qui concerne ses propriétés chimiques, ne semblait pas présumer que cette altération provînt de la formation d'un oxyde particulier. C'est à M. Beetz qu'on doit d'avoir mis hors de doute l'existence de cette couche d'oxyde dans le fer rendu passif; il a démontré, contrairement à M. Martens, que la couleur bleue que prend du fer quand on le chauffe est due à la formation d'une légère couche d'oxyde, et il a fait voir que si cette couche se forme quelquefois dans l'hydrogène à la chaleur rouge, cela tient à la décomposition de l'eau que renferme ce gaz [1], de sorte que si on parvient à avoir le gaz parfaitement desséché et parfaitement pur, la coloration n'a plus lieu, même à une très-haute température.

M. Beetz s'est assuré, en chauffant un fil de fer dans un bain métallique et en ayant soin d'empêcher le fil de conserver une couche d'air adhérente à sa surface, que ce fil n'est point passif et qu'il est même positif quand il forme un couple avec un fil de fer très-poli. Il a démontré, par des expériences multipliées et faites avec beaucoup de soin, qu'il suffit de frotter ou de laver dans un acide un fil de fer qui a été rendu passif par l'action de la chaleur ou par celle de l'acide nitrique, pour détruire sa passivité, parce qu'on enlève ainsi la pellicule d'oxyde à laquelle tient

[1] Cette même coloration que prend le fer à une très-haute température dans le gaz hydrogène, disparaît à une température moins élevée par la réduction que l'hydrogène fait éprouver à la couche d'oxyde.

cette passivité. Il est facile d'expliquer, par la formation ou la réduction de cette couche d'oxyde, tous les phénomènes divers que présente le fer quant à sa passivité et à son activité chimique, lorsqu'il sert d'électrode dans un liquide électrolytique. C'est ainsi que lorsqu'on forme un couple dans l'acide nitrique de 1,40 avec un fil de fer ordinaire et un fil de fer passif, le second rend le premier passif comme le ferait un fil de platine, en déterminant un courant qui l'oxyde légèrement, tandis que lui-même se désoxyde. Il devient alors actif à son tour, et c'est le second qui est rendu passif; le phénomène recommence, les deux fils ayant ainsi changé de rôle, et il peut se renouveler indéfiniment de la même manière.

Le bismuth, le nickel et le cobalt sont susceptibles de devenir passifs comme le fer, soit par l'effet de la chaleur, soit par l'effet de leur emploi comme électrodes positifs dans la décomposition électrolytique de l'eau acidulée. M. Andrews, qui le premier a démontré la passivité du bismuth, l'a obtenue en mettant ce métal en contact avec du platine dans l'acide nitrique de la densité de 1,40; il suffit même, pour se procurer une surface passive de bismuth, de remplir un tube de cuivre de bismuth en fusion et de faire une section dans le culot ainsi refroidi; plongée dans l'acide nitrique de 1,40, cette section n'est pas attaquée. Il est évident que la passivité, dans ce cas comme dans celui du fer, est due à la formation d'une couche mince d'oxyde sur la surface des métaux, couche qui se forme même sur le bismuth à la température ordinaire, ainsi que le prouvent les teintes colorées de ce métal. M. Beetz avait déjà constaté la passivité du nickel; elle a été confirmée par M. Nicklès qui l'a établie également pour le cobalt; il a trouvé que, pour que l'état passif de ces deux métaux soit stable, il ne suffit pas de les plonger dans l'acide nitrique de 1,40, qu'il faut les bleuir à la lampe à alcool ou sur un feu de charbon et les plonger tout bouillants dans cet acide.

Il est donc évident que la passivité n'est qu'un phénomène purement électro-chimique provenant de l'impossibilité où se trouvent les oxydes de certains métaux, lorsqu'ils ne sont qu'à

un faible degré d'oxydation, de former des sels avec les acides nitrique ou sulfurique. Il résulte de ce défaut d'affinité que les métaux dont il s'agit ne peuvent former avec le platine des couples voltaïques, nouvelle preuve, comme le remarque M. Schoenbein, du rôle que joue l'affinité chimique dans la production de l'électricité voltaïque, et nouvel argument par conséquent, contre la théorie du contact. Envisagée de cette manière, la passivité n'est que l'effet de la présence d'une couche mince d'une substance hétérogène (une pellicule d'oxyde) sur la surface d'un métal, ce qui justifie la place que nous avons donnée à son étude dans ce paragraphe.

Un dernier phénomène électrique qui provient du dépôt de couches hétérogènes très-minces sur la surface des métaux, est celui de la production de courants électriques par l'action de la lumière sur ces dépôts, quand ils sont d'une nature particulière. M. E. Becquerel a obtenu en effet des courants électriques très-prononcés, en déterminant des actions chimiques au moyen de la lumière sur des plaques métalliques de platine, par exemple, recouvertes d'une couche impressionnable telle qu'une couche de chlorure, d'iodure ou de bromure d'argent. Une plaque ainsi préparée est plongée dans l'eau acidulée avec une autre plaque également de platine, mais dont la surface est parfaitement nette, et on fait communiquer l'une et l'autre avec les deux bouts d'un galvanomètre. Dès qu'on fait agir un rayon de lumière sur la couche impressionnable, on détermine un courant électrique dans lequel la lame recouverte de cette couche prend l'électricité positive, comme le ferait du peroxyde de plomb; effet dû à la combinaison avec l'hydrogène de l'eau, sous l'influence de la lumière, du chlore, du brome ou de l'iode de la couche dont la lame de platine est recouverte, et par conséquent à la décomposition chimique de cette couche. M. E. Becquerel a tiré parti de cette propriété pour construire, sous le nom d'*actinomètre électro-chimique*, un appareil qui lui permet d'apprécier, avec la plus grande sensibilité, l'énergie avec laquelle les rayons de la lumière agissent sur une combinaison chimique, et par conséquent de comparer sous ce rapport les rayons de diverse réfrangibilité et les modifications que

leur imprime leur passage à travers des écrans de natures diverses. La solution dans laquelle les deux lames sont plongées est une solution étendue de sulfate de soude; les deux lames sont d'argent; l'une est décapée et a sa surface bien nette; l'autre est recouverte d'une couche d'un sous-chlorure particulier d'argent, qui est violet, et qui est de toutes les couches impressionnables celle qui est la meilleure, parce qu'elle donne au galvanomètre, un effet électrique qui est en rapport avec l'action chimique produite [1]. Elle a, en outre, la propriété de recevoir des impressions colorées de la part de tous les rayons lumineux également, et de plus de prendre elle-même une teinte semblable à celle du rayon qui l'a impressionnée; c'est comme une espèce de rétine inorganique. Nous ne pouvons entrer ici dans les détails de construction et de préparation de l'appareil de M. Becquerel et des différentes parties dont il se compose, non plus que dans l'exposition des résultats qu'il a obtenus en s'en servant; ce serait sortir des limites que nous nous sommes imposées, vu qu'il s'agirait des propriétés de la la lumière et non plus de celles de l'électricité, car elle n'est ici que le moyen employé pour obtenir un appareil destiné à un tout autre genre d'études.

§ 4. Production d'électricité dans la combustion et par l'action combinée de la chaleur et de l'affinité chimique.

Une fois qu'il est bien prouvé que toute action chimique donne naissance à de l'électricité, il est évident que la combustion, qui est une des actions chimiques les plus prononcées, doit en dégager aussi. L'étude de l'état électrique de la flamme a attiré l'attention des physiciens dès les premiers temps qu'on s'est occupé d'électricité. C'est surtout sous le rapport de l'influence qu'elle exerce sur les corps déjà électrisés en leur soutirant leur électricité et en s'en chargeant, que la flamme a été envisagée : Dufay, Winkler, Watson, Franklin, Priestley avaient

[1] On produit ce sous-chlorure en se servant de la lame d'argent sur la surface de laquelle on veut qu'il se trouve, comme électrode positif dans de l'acide chlorhydrique ; il faut avoir soin de n'employer qu'un courant de faible intensité.

fait déjà beaucoup d'expériences sur ce pouvoir des flammes. Humboldt n'avait pas trouvé à cet égard de différences entre les diverses espèces de flammes, telles que celles d'une mèche à huile, d'une bougie, du phosphore, de l'hydrogène et du soufre. Il attribuait l'action de la flamme à la conductibilité de l'ensemble des substances qui en émanent, telles que particules charbonneuses, vapeurs d'eau, acide carbonique, etc. Volta, qui s'est beaucoup occupé de ce sujet, croyait que la propriété de la flamme de décharger les corps électrisés tenait au courant d'air qu'elle détermine, et à ce qu'en même temps elle rend l'air conducteur en le chauffant et le raréfiant. Nous avons vu [1] que Riess, après avoir analysé avec beaucoup de soin la faculté des flammes et des substances en combustion, telles que le charbon, de soutirer l'électricité des corps qui en sont chargés, avait démontré qu'elles agissent comme une multitude de petites pointes; mais il faut pour cela que les filets de vapeur qui se forment dans la combustion, ainsi que les molécules qui jouent le rôle de pointes, soient d'une nature conductrice; tel est le cas, par exemple, avec la vapeur d'eau et les particules de charbon.

En étudiant le pouvoir conducteur des corps en combustion, on n'avait pas tardé à voir qu'il présente des anomalies. Ainsi on avait remarqué que le charbon, lorsqu'on en modère la combustion, décharge inégalement l'électricité positive et la négative, et qu'il en est de même de la lampe aphlogistique de Davy [2]; ce qui ne tient point, comme Ermann l'avait cru, à une propriété particulière du fil de platine incandescent, mais bien aux pointes de vapeur qui s'élèvent de ce fil. C'est l'électricité positive que la lampe de Davy transmet le mieux à un conducteur en contact, tandis que c'est la négative qui est le plus facilement communiquée dans les mêmes circonstances par une pointe de charbon en combustion. Nous allons voir que cette

[1] Tome II, page 91.

[2] On sait que dans la lampe aphlogistique de Davy, un fil de platine tourné en hélice est tenu incandescent par la vapeur d'alcool qui vient brûler à sa surface, phénomène qui tient, comme nous l'avons vu plus haut page 350, à une série d'oxydations et de réductions qu'éprouve le fil de platine.

Digitized by Google

inégalité d'action dans la propriété conductrice pour les deux électricités dans ces deux cas n'est qu'apparente, et tient à ce que, dans l'un et dans l'autre, il y a une production même d'électricité par l'effet de la combustion.

Volta avait déjà mis en évidence l'électricité dégagée dans la combustion du charbon, en ne se servant, pour activer cette combustion, que d'un faible courant d'air, afin qu'elle ne fût pas trop vive, car, sans cette précaution, les signes électriques étaient fort peu sensibles. Mais c'est M. Pouillet qui a constaté le premier, par des expériences décisives, la production d'électricité dans la combustion, soit du charbon, soit de l'hydrogène. Il a trouvé, conformément à ce qui a lieu dans le développement d'électricité par les actions chimiques, que le charbon se charge d'électricité négative, et l'acide carbonique qui s'en échappe d'électricité positive: pour obtenir ce résultat, il a taillé en cylindre un morceau de charbon bon conducteur; puis, après avoir enflammé une de ses extrémités, il l'a placé par l'autre bout sur une plaque de métal en communication avec le plateau supérieur d'un condensateur; il a alors soufflé sur le charbon, au moyen d'une vessie remplie d'air, pour entretenir la combustion dans sa partie supérieure seulement; le plateau inférieur étant mis en communication avec le sol, il a réussi à charger le supérieur d'électricité négative. Pour recueillir l'électricité positive dont se charge l'acide carbonique, il faut placer le cylindre de charbon à quelque distance au-dessous de la plaque de métal qui communique avec le plateau du condensateur, en ayant soin de le mettre lui-même en communication avec le sol. L'acide carbonique cède son électricité à la plaque à mesure qu'il s'élève contre sa surface. Dans la combustion de l'hydrogène, l'oxygène s'électrise positivement, et l'hydrogène négativement; pour recueillir l'électricité négative de l'hydrogène, on adapte à la vessie qui le contient un tube de métal qu'on fait communiquer au condensateur, et à l'extrémité duquel on enflamme le gaz, ou bien on ajuste au plateau du condensateur un long fil de platine dont l'extrémité est roulée en spire étroite qu'on fait plonger soigneusement en totalité dans l'intérieur de la flamme. On recueille l'électricité

positive de l'oxygène en présentant la même spire de platine à quelque distance de la flamme; il faut avoir soin de lui donner un diamètre plus grand que celui de la flamme, de manière qu'elle puisse l'envelopper. Elle peut prendre même, à une distance de plusieurs millimètres, l'électricité positive dont l'air ambiant s'est également chargé. Il est plus probable que c'est la vapeur d'eau et non l'oxygène qui, dans la combustion de l'hydrogène, prend l'électricité positive comme l'acide carbonique la prenait dans la combustion du charbon.

Les phénomènes électriques qui accompagnent la combustion sont moins simples que cela ne paraîtrait, d'après les résultats obtenus par M. Pouillet; c'est surtout dans l'électricité que dégagent les flammes que les anomalies sont sensibles. M. Hankel s'est assuré, au moyen d'une lame de platine placée au-dessus de la flamme d'une lampe à alcool, que celle-ci se charge d'électricité positive, pourvu que la lampe communique avec le sol. Il faut que la lampe soit en métal; si elle est en verre, on place un fil de platine à la base de la mèche ou dans l'alcool qu'on fait communiquer avec le sol. On recueille de l'électricité négative en faisant communiquer avec le condensateur, soit ce fil, soit la lampe, et en mettant la lame de platine qui est au-dessus de la flamme en communication avec le sol; ces conditions sont indispensables pour avoir des signes électriques. En prenant, comme avec une espèce de sonde, au moyen de fils de platine enfermés dans des tubes de verre, et dont l'extrémité seule est à nu, l'électricité des différentes parties de la flamme, M. Hankel leur a trouvé des tensions très-différentes. Avec une petite flamme de gaz hydrogène sortant d'un robinet en laiton qui communiquait avec le sol, il a obtenu des signes d'électricité positive qui allaient en croissant d'intensité à mesure que le platine qui la soutirait s'approchait de l'extrémité de la flamme, et qui était à son maximum à cette extrémité même. Les effets étaient semblables, seulement l'électricité était de nature contraire, quand la lame de platine communiquait avec le sol, et le robinet avec le condensateur.

Outre les signes de tension, M. Hankel a obtenu des courants électriques en faisant communiquer le fil d'un galvano-

mètre d'une part avec une lampe, d'autre part avec une lame de platine placée au-dessus de la flamme; le courant était dirigé dans la flamme, du haut en bas. Il faut, dans ce cas, pour que le courant soit un peu fort, que la combustion ait autant de vivacité que possible; c'est pourquoi on doit tenir la lame de platine, non pas horizontalement, mais un peu inclinée au-dessus de la flamme. La présence du métal n'est pas indispensable pour le succès de l'expérience; on peut le remplacer par un conducteur humide, même par la main mouillée. Afin de s'assurer de la part que peut avoir dans l'intensité du courant une variation dans la conductibilité même de la flamme, M. Hankel a introduit dans le circuit le courant d'un petit couple, de manière qu'il fût dirigé dans un sens contraire à celui du courant de la flamme; le premier courant étant constant, il a été facile de s'assurer, d'après les variations dans l'effet observé, que l'intensité du second augmentait bien avec l'étendue et la vivacité de la combustion. Un fait assez extraordinaire observé par M. Hankel, c'est que la flamme d'hydrogène donne des résultats précisément contraires à ceux de la flamme à alcool, soit qu'on étudie son état électrique au moyen du condensateur, soit qu'on le constate au moyen du galvanomètre; ainsi le courant chemine de bas en haut dans la flamme d'hydrogène quand le circuit est fermé, au lieu de cheminer de haut en bas, comme avec la flamme d'alcool.

Becquerel qui déjà, avant les recherches de Pouillet, avait étudié l'état électrique de la flamme d'alcool et de celle d'hydrogène, était arrivé à croire que le phénomène de la combustion n'est pas la seule cause de l'électricité dégagée. Il avait remarqué que les fils ou lames conductrices prennent de l'électricité négative ou positive qu'ils communiquent à la flamme, suivant le degré de température qu'ils acquièrent en étant chauffés par elle; il en avait conclu que la flamme exerce une action électromotrice sur les corps qui entrent en contact avec elle, et que par conséquent les lames ou les fils métalliques qu'on y plonge ne jouent pas simplement le rôle de conducteurs. Les expériences de Hankel ne sont pas de nature à réfuter complétement cette idée, puisque ce physicien est

toujours obligé, pour percevoir l'électricité, de mettre la flamme en contact avec des corps hétérogènes, lors même qu'au lieu de métaux, ce sont des conducteurs humides ou la main.

M. Buff, qui a fait une étude toute particulière de la nature électrique de la flamme, est arrivé à un résultat semblable. Après avoir constaté, par des expériences délicates, que l'air, l'hydrogène, l'acide carbonique et la vapeur d'eau sont très-mauvais conducteurs jusqu'à 400°, il a réussi, en les réchauffant jusqu'à une température plus élevée encore, à les faire traverser par le courant de deux couples de Daniell; il a trouvé de plus que ces corps gazeux, lorsqu'ils sont à une température très-élevée, peuvent développer de l'électricité dans d'autres corps conducteurs, tant solides que gazeux, mis en contact avec eux. Mais il a constamment observé, en plongeant les deux bouts de platine du galvanomètre dans des parties différentes de la flamme, que le courant allait du fil le plus chauffé à celui qui l'était le moins, d'où il a conclu que l'effet provenait d'un courant thermo-électrique.

Cependant, quand il s'est servi du condensateur, Buff a obtenu de l'électricité positive en touchant, avec un fil de platine en communication avec le condensateur, la partie extérieure de la flamme, et de la négative en pénétrant dans la partie intérieure; ce résultat est indépendant de la température des fils, qui donnerait un effet contraire de nature à diminuer l'intensité de celui qui est observé. Les corps des lampes, quand elles sont en métal, soutirent l'électricité négative de la partie intérieure de la flamme si on les met en communication avec le sol, tandis que tout conducteur, tel qu'une lame de métal, du bois humide, ou même la main humectée, soutire l'électricité positive de la partie extérieure. Si avec une lampe à alcool on a un effet inverse de celui qu'on a avec l'hydrogène, comme l'a observé Hankel, cela tient, ainsi que Buff s'en est assuré, à ce que le conducteur métallique est en contact avec la mèche, et par conséquent se trouve humecté d'alcool; alors c'est l'effet thermo-électrique des métaux qui l'emporte, le fil qui est recouvert d'alcool étant nécessairement moins chaud que l'autre. Aussi, dès qu'au lieu de toucher avec la mèche le fil qu'on introduit

dans l'intérieur de la flamme, on l'élève un peu au-dessus, on ne voit plus se produire le fait exceptionnel. Ainsi donc on peut regarder comme établi que toute flamme, celle d'une lampe à alcool aussi bien que celle d'une lampe à huile ou celle de l'hydrogène, répand dans l'air extérieur qui l'entoure, de l'électricité positive dès qu'on conduit dans le sol l'électricité négative de la partie intérieure. Tous ces phénomènes sont, suivant M. Buff, des effets thermo-électriques dans lesquels les gaz et les vapeurs sont aussi bien des corps agissant que les métaux; ils n'ont, par conséquent, aucun rapport avec les phénomènes chimiques de la combustion; aussi ce physicien pose-t-il comme principe, que lorsqu'on forme un circuit thermo-électrique avec de l'air, de l'hydrogène ou de la vapeur d'alcool, du charbon ou du métal, il se développe un courant électrique qui se meut à travers l'air, de la place de contact la plus chaude à la moins chaude.

Les recherches de M. Buff, comme celles de M. Hankel, laissent donc encore indécise la question de savoir si l'électricité qu'on obtient en introduisant des corps solides dans les flammes a une origine purement thermo-électrique, ou si elle dépend, sinon en totalité, du moins en partie, du phénomène de la combustion. M. Grove a cherché à la résoudre de la manière suivante. Il se sert de deux fils de platine de 15 centimètres de longueur et de $\frac{1}{4}$ millimètre de diamètre environ, qui sont roulés l'un et l'autre en hélice à l'une de leurs extrémités, pendant qu'ils communiquent par leur autre extrémité, au moyen d'un fil de cuivre isolé, avec le fil d'un galvanomètre sensible; l'une des petites hélices est placée entièrement dans la partie jaune de la flamme d'une lampe à alcool soumise à l'action du chalumeau, tout près du sommet du cône bleu, et l'autre hélice est disposée près de l'orifice du courant d'air à la base du cône bleu, soit à la racine de la flamme; les deux hélices sont à une distance l'une de l'autre de 5 à 6 centimètres. L'hélice qui est dans la flamme pleine arrive à l'état incandescent rouge-blanc; l'autre qui est à l'origine de la flamme est seulement rouge-cerise. Le galvanomètre indique une déviation de 6°, l'hélice qui est près de l'orifice jouant le

rôle du zinc ou de métal positif dans cette espèce de couple, par rapport à l'autre qui joue le rôle de métal négatif.

Il est facile de s'assurer que l'effet observé n'est point dû à un courant thermo-électrique développé aux points de jonction des fils de platine et de cuivre, car il n'est point altéré quand on chauffe seulement l'un de ces points de jonction par une lampe à alcool. D'ailleurs, le léger courant thermo-électrique qu'on peut obtenir ainsi, chemine en sens contraire du courant dont il s'agit, ce qu'on peut constater aisément; et de plus le courant thermo-électrique exige, pour être perçu, un galvanomètre à fil court, tandis qu'il faut pour l'autre un galvanomètre à fil long. Ce n'est pas non plus un courant thermo-électrique dû au réchauffement inégal des deux hélices de platine, car on peut éloigner l'hélice qui est dans la flamme jaune, de manière qu'elle soit moins chauffée que celle qui est à la base de la flamme, sans changer pour cela le sens du courant. Si l'on approche l'hélice qui est à la base de la flamme du côté de celle qui est vers le sommet, la déviation du galvanomètre diminue, mais elle conserve sa direction jusqu'à ce que les fils soient devenus très-voisins, cas dans lequel le courant de la flamme cède le pas au courant thermo-électrique, dont le sens dépend de celle des deux hélices qui est la plus chauffée.

Des fils de zinc, de fer et de cuivre ont été substitués à l'un des fils de platine; le courant a eu lieu également, mais plus fortement quand les fils oxydables étaient dans la flamme pleine et les fils de platine à la base de la flamme, que dans le cas inverse. Cette différence tient probablement à ce que les fils oxydables étant plus épais, ils produisaient quand ils étaient dans la flamme pleine un effet de refroidissement qui facilitait le développement d'un courant thermo-électrique, dirigé dans le même sens que le courant propre de la flamme.

On peut obtenir un effet bien plus prononcé en unissant l'action simultanée de ces deux courants. C'est ce que M. Grove a obtenu en formant avec une lame de platine un petit cône d'un peu plus d'un centimètre de profondeur et d'autant de largeur, et en remplaçant par ce petit cône suspendu dans un

anneau de platine l'hélice placée dans la flamme pleine; l'autre hélice étant toujours à la base de la flamme. Le petit cône devait être rempli d'eau, et l'on y renouvelait cette eau en la versant goutte à goutte au moyen d'une pipette. M. Grove a réussi à obtenir ainsi une déviation du galvanomètre de 20° et même de 30°, dont le sens était le même que celui de la déviation qui avait eu lieu dans ses premières expériences. Quand le cône rempli d'eau était placé à la base de la flamme et l'hélice en haut, la déviation n'était plus que de 5°.

M. Grove conclut de ses recherches qu'il existe dans la flamme un vrai courant voltaïque qui est complétement indépendant de la thermo-électricité, ce qui le conduit à regarder ce courant comme résultant de la production de l'électricité qui a lieu dans le phénomène de la combustion, ainsi que le prouve l'expérience par laquelle M. Pouillet charge un condensateur d'électricité négative en faisant brûler un morceau de charbon sur sa surface. Dans les expériences qui précèdent, le platine, qui est à la base de la flamme, là où l'action chimique commence, joue le rôle du zinc du couple, et le platine qui est au haut, là où la combustion et par conséquent l'action chimique est terminée, le rôle du métal négatif ou conducteur.

Ce qui fait que ce courant propre, dû à la combustion, a pu être observé par M. Grove d'une manière bien distincte du courant thermo-électrique, c'est que l'emploi du chalumeau, en donnant à la flamme une direction bien déterminée, y sépare nettement les portions où la combustion s'opère de celles où elle est opérée, tandis que dans les flammes ordinaires ces portions sont mêlées, et circulent d'une manière confuse les unes parmi les autres.

M. Becquerel, malgré les expériences de M. Grove, a persisté à ne pas voir comme Buff, dans les courants électriques dégagés dans la flamme, autre chose que des effets thermo-électriques. Il remarque que, si on plonge l'un des bouts du platine dans l'alcool de la lampe maintenu à 0° par de la glace fondante, et que l'on fixe à l'autre extrémité du galvanomètre un cylindre de platine rempli aussi de glace, on n'a de courant, en plaçant ce cylindre dans l'intérieur de la flamme,

que lorsque la glace qu'il renferme étant fondue, le cylindre peut se réchauffer, preuve que le courant est thermo-électrique. Cela est vrai dans ce cas, mais il n'en résulte point qu'il ne puisse exister un courant électro-chimique, quand au lieu de mettre la lame ou le fil de platine dans l'alcool on le place dans la flamme à sa base même, condition nécessaire pour que ce courant puisse s'établir, comme nous allons le voir. M. Becquerel place encore symétriquement les deux spirales en platine S et S′ dans la même section horizontale de la flamme F d'une lampe à alcool L (fig. 321), de manière à atteindre la température rouge, et dans ce cas il n'y a pas de courant; mais si au moyen d'une seconde lampe et du chalumeau, on chauffe l'une des spirales jusqu'au rouge blanc, il se produit un courant qui va de la spirale rouge cerise à la spirale rouge blanc. Le courant a donc une direction inverse de celle qu'il possède, quand l'une des spirales est dans l'alcool à la température ordinaire, tandis que l'autre est dans la flamme avec une température qui ne dépasse pas l'incandescence; ce qui prouverait que les propriétés thermo-électriques du platine changeraient à des températures élevées. Une autre manière de constater le même résultat consiste à

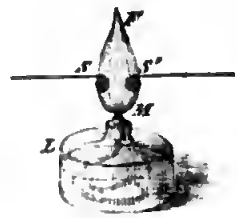


Fig. 321.

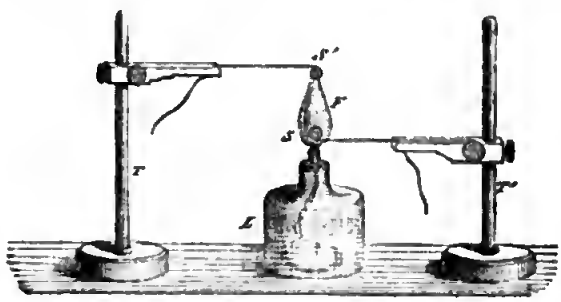


Fig. 322.

placer les deux spirales, tenues au moyen de deux supports qui permettent de les faire monter et descendre (fig. 322), l'une à l'extrémité S′ visible de la flamme F, l'autre à sa base S dans sa partie bleue, et à une distance de trois décimètres de la

première. Il se produit un courant qui va de bas en haut dans la flamme; en élevant successivement la spirale inférieure jusqu'à quelques millimètres de distance de la supérieure, le courant augmente d'intensité, et cette augmentation est encore plus considérable si l'on chauffe avec une seconde lampe et un chalumeau la spirale supérieure. Le fait qu'il n'y a aucun courant quand les deux spirales étant placées dans l'enveloppe extérieure de la flamme, elles sont à la même température, et qu'il suffit d'en chauffer fortement une sans les changer de place pour qu'il y ait courant, conduit M. Becquerel à conclure que le courant est thermo-électrique, et qu'il doit en être de même de celui qu'on obtient avec les deux spirales inégalement chauffées, placées l'une au sommet, l'autre à la base de la flamme; d'autant plus qu'on augmente l'état positif de celle qui est au sommet en la chauffant davantage. Mais dans sa manière d'opérer le réchauffement, M. Becquerel apporte une grande modification à l'expérience en introduisant l'action d'une seconde flamme qui peut jouer un autre rôle que celui de réchauffer simplement la spirale.

Nous croyons donc que, malgré les expériences ingénieuses de M. Becquerel, nous devons admettre avec M. Grove qu'il y a deux courants dans la flamme, l'un thermo-électrique, l'autre dû à une action chimique. Quant à ce dernier, M. Matteucci nous paraît en avoir trouvé la véritable cause[1]. Lorsqu'il s'agit d'une flamme d'alcool ou d'hydrogène, ce qui revient au même, voici ce qui se passe. L'une des lames est en contact avec l'oxygène de l'air ambiant, l'autre avec l'hydrogène; ces deux lames

[1] M. Matteucci, dans ses recherches sur l'électricité de la flamme, commence par déterminer la conductibilité électrique de différentes flammes, en s'en servant pour transmettre au moyen de deux fils de platine le courant de deux couples de Daniell. Lorsque les fils ne sont plus qu'à deux ou trois millimètres de distance dans la flamme d'une lampe à double courant d'air, il s'aperçoit que la flamme commence à devenir conductrice, probablement par une cause semblable à celle qui fait que le courant est transmis à travers des gaz élevés à une haute température dans les expériences de M. E. Becquerel (p. 103). Les flammes de cire et d'acide stéarique sont sensiblement plus conductrices que celles d'alcool, si on a soin d'empêcher la formation sur les fils de platine d'une couche de matière noire qui empêche la transmission du courant.

sont séparées par une couche de vapeur aqueuse formée par la combustion ; on a donc ainsi une véritable pile à gaz comme celle de Grove, avec cette différence que l'électrolyte est ici la vapeur d'eau. Le sens du courant est parfaitement d'accord avec cette explication, et on voit pourquoi M. Becquerel n'obtient pas d'effet en mettant l'une de ses spirales dans l'alcool ou en les mettant toutes les deux en contact avec la partie extérieure de la flamme et par conséquent avec l'oxygène. Quand il en réchauffe une avec le dard du chalumeau, il est évident qu'il la met en contact non plus avec l'air et par conséquent avec l'oxygène, mais bien avec l'hydrogène ou la vapeur d'alcool de la nouvelle flamme; il doit donc la rendre positive, comme cela a lieu effectivement. A l'appui de son explication, M. Matteucci cite un grand nombre d'expériences, d'abord celles par lesquelles il a constaté, au moyen d'une spirale en platine qu'il fait communiquer avec le condensateur, qu'on n'obtient aucun signe électrique en dirigeant sur elle différentes parties d'une flamme d'hydrogène bien isolée; tandis que si en la tenant toujours plongée dans la flamme de l'hydrogène, on en place une semblable en communication avec le sol à 3 ou 4 centimètres au-dessus, on trouve à l'électroscope des signes marqués et constants d'électricité négative analogues à ceux que donnerait une lame en contact avec l'hydrogène dans un couple à gaz de Grove, dont l'autre lame serait en contact avec de l'oxygène et communiquerait avec le sol. En faisant communiquer la seconde spirale avec le condensateur et la première avec le sol, on obtient des signes prononcés d'électricité positive. Si l'on se sert de spirales de platine noircies, soit platinées, les effets sont les mêmes, mais seulement plus forts. En remplaçant les lames de platine par des métaux oxydables, on a des signes électriques moins nets et les phénomènes deviennent complexes, parce qu'une partie de l'électricité dégagée doit provenir de la décomposition de la vapeur d'eau par ces métaux chauffés au rouge. A l'appui de l'analogie qu'il établit entre le phénomène de l'électricité de la flamme et celui de l'électricité produite dans un couple à gaz, M. Matteucci cite une expérience, dans laquelle il a obtenu des signes très-forts de tension électrique

en plaçant deux lames de platine platinées, l'une dans de l'hydrogène, l'autre dans de l'oxygène, les deux gaz étant renfermés dans deux cloches renversées sur la même cuve qui était elle-même remplie d'eau pure ou légèrement acidulée, dans laquelle les deux lames plongeaient en partie.

Pour prouver l'existence des polarités secondaires dans les fils de platine qui plongent dans différentes parties de la flamme, M. Matteucci dispose deux fils de platine de façon qu'ils puissent être en contact, l'un avec l'intérieur de la flamme d'une lampe à alcool et l'autre avec sa surface ou avec sa pointe; la déviation du galvanomètre indique que le courant va dans la flamme de la base à la pointe. On éteint la flamme, on laisse refroidir les fils, puis on ferme le circuit avec de l'eau; on a un courant très-fort dirigé dans le même sens que celui qu'on obtenait avant que l'eau eût remplacé la flamme. Ces deux courants sont donc dus évidemment à la même cause, et si le premier est plus faible, cela tient à l'imparfaite conductibilité de la flamme, ou plutôt de la vapeur d'eau, qui éprouve la décomposition électrolytique de la part de l'hydrogène et de l'oxygène adhérents respectivement aux deux lames de platine, entre lesquelles cette vapeur est interposée.

M. Grove, tout en admettant les idées de M. Matteucci sur l'origine du courant électro-chimique de la flamme, ne croit pas que ce soit l'eau à l'état de vapeur qui joue le rôle de l'électrolyte, mais bien la flamme elle-même qui formerait une chaîne électro-chimique dans laquelle chaque particule de charbon ou d'hydrogène se combinerait avec la particule voisine d'oxygène et ainsi de suite, en déterminant une série de combinaisons et de décompositions avec excès d'oxygène à l'une des extrémités de la flamme, et excès d'hydrogène carboné à l'autre. Cependant rien ne prouve que la vapeur d'eau à une haute température ne puisse pas éprouver une décomposition électrolytique; les phénomènes de la polarité électro-chimique des gaz découverts par M. Grove lui-même, que nous avons décrits plus hauts [1] sont tout à fait favorables à cette supposition que

[1] Tome II, pages 402 et suiv.

légitiment, comme nous le verrons plus loin, d'autres faits relatifs au rôle que joue la vapeur d'eau dans la production des phénomènes électriques attribués au contact, et dans sa propriété conductrice pour l'électricité.

M. Matteucci explique d'une manière analogue l'origine de l'électricité qui est dégagée dans la combustion du charbon; il remarque avec raison que la forme et la position du charbon sont indifférentes au succès de l'expérience, ce que M. Gaugain a confirmé[1]; mais il ajoute, ce qui est également exact, que pour que l'expérience réussisse, il faut que l'air soit humide; de plus, il y a toujours dans le charbon ordinaire de l'hydrogène qui brûle avec le charbon même, et par conséquent formation d'eau. Cette eau est décomposée par le charbon incandescent comme elle le serait par un creuset de fer chauffé dans lequel on la projetterait, et elle doit, par sa décomposition, rendre le charbon négatif pendant que l'hydrogène et l'acide carbonique emportent l'électricité positive. Le point sur lequel insiste le savant italien en faveur de sa théorie est qu'il est impossible de trouver des signes d'électricité dans la combustion du charbon pur dans le gaz oxygène sec, non plus que dans celle des métaux, tels que le fer et le zinc; d'où il conclut que, pour qu'il y ait développement d'électricité, il faut la décomposition d'un électrolyte, et que la simple combinaison des deux éléments ne suffit pas. Nous examinerons plus loin jusqu'à quel point cette opinion est fondée.

Avant de terminer ce paragraphe, nous dirons quelques mots d'une classe particulière de courants que M. Becquerel a désignés sous le nom de *pyro-électriques*, et qui sont aussi, comme ceux de la flamme, dus à l'action combinée de la chaleur poussée à un haut degré et de l'affinité chimique. Ces

[1] M. Gaugain trouve qu'on réussit très-bien à charger un condensateur d'électricité négative au moyen de la combustion du charbon, en ayant soin de choisir un morceau de charbon bon conducteur, puis de l'allumer, et après l'avoir mis en communication avec le plateau du condensateur, de placer à 2 ou 3 millimètres de la surface enflammée, une spirale de platine ou tout autre conducteur qu'on fait communiquer avec le sol. Il faut en commençant attiser pendant quelque temps la combustion avec un soufflet.

courants sont produits toutes les fois que des substances métalliques sont en contact avec des substances vitreuses à l'état de fusion ignée, ou tout au moins ramollies par la chaleur. Si on introduit dans un fourneau rempli de charbons allumés une tige de fer doux et une de cuivre, en relation chacune avec l'une des extrémités d'un galvanomètre, on n'a pas de courant, tandis qu'on en obtient un si la tige de cuivre est enveloppée d'un tube de verre, pourvu qu'on pousse la température jusqu'au point de fusion de ce verre. Le courant augmente d'intensité à mesure qu'on chauffe à partir du point où le verre se ramollit; puis, lorsqu'on est parvenu au point de fusion, le courant a atteint son maximum et demeure constant. Le courant va du fer au cuivre à travers le charbon et le verre; le fer s'oxyde et le cuivre reste intact, comme cela aurait lieu dans un couple hydro-électrique.

Le dégagement de l'électricité a donc une origine purement chimique, provoquée seulement par la chaleur; car si lorsque le verre qui entoure le cuivre étant fondu partiellement, il arrive que ce métal touche le fer, il n'y a plus d'effet, contrairement à ce qui devrait arriver si le courant était thermo-électrique. On obtient un effet semblable en remplaçant le fer par un morceau de charbon de cornue taillé en cylindre, qui éprouve une véritable combustion.

Pour avoir des effets plus prononcés et plus durables, M. Becquerel place dans un creuset de terre une lame de cuivre qu'il recouvre de verre pilé dans lequel il fait pénétrer une tige de fer; puis il place le creuset dans un fourneau à réverbère. Il réussit également bien à se procurer un courant fort et constant en introduisant deux longues tiges, l'une de fer, l'autre de cuivre, dans un creuset rempli de verre pilé auquel il ajoute 0,25 de carbonate de soude pour faciliter la fusion. Quoique d'autres substances vitreuses puissent jouer le même rôle que le verre, celui-ci a paru préférable dans tous les essais qu'on a faits.

M. Buff, de son côté, à la suite d'expériences sur la conductibilité du verre chauffé, est parvenu à construire une pile dans laquelle le liquide électrolytique est remplacé par le

verre. Il a placé les uns au-dessus des autres, et dans le même ordre, des disques de laiton doré, des disques de zinc découpé et des plaques minces de verre; puis il a attaché des fils de platine au premier disque et à celui qui recouvrait la dixième plaque de verre : la pile ainsi formée avait 4 centimètres de hauteur. Les plaques furent pressées les unes contre les autres, de manière à pouvoir être soumises au courant d'air chaud d'une lampe d'Argand. Cette pile, au bout de peu de temps, pouvait produire une divergence de 10 millimètres à l'électroscope à feuilles d'or. Quand les disques étaient chauffés, un contact de quelques secondes produisait une divergence de 35 millimètres au moins. Une pile semblable, et qu'on a souvent employée, n'avait rien perdu de sa force électromotrice primitive au bout de cinq mois.

§ 5. Application des principes qui précèdent à la construction et à la théorie des différentes piles voltaïques.

Nous avons établi d'une manière générale la théorie de la pile voltaïque dans le § 1; mais nous ne pouvions pas, avant d'avoir achevé l'étude du dégagement de l'électricité dans les formes diverses que revêt l'action chimique, apprécier toutes les causes qui peuvent influer sur la puissance de cet appareil, ni indiquer les modifications par lesquelles on peut l'augmenter. Maintenant que cette étude est complète, il nous est facile de faire l'analyse détaillée de tout ce qui se passe dans un circuit dont la pile fait partie, et de trouver les moyens de donner à son action toute l'énergie dont elle est susceptible.

Un circuit voltaïque fermé peut être envisagé, ainsi que nous l'avons déjà remarqué, comme un système de conducteurs dans lesquels l'électricité se propage par une suite de décompositions et de recompositions des électricités de leurs molécules consécutives. Ces décompositions et recompositions des électricités sont accompagnées dans les liquides électrolytiques qui servent à charger les couples de la pile, et dans ceux qui se trouvent dans les voltamètres quand il y en a dans le circuit, de la décomposition et de la recomposition des molécules elles-mêmes. L'action

est la même, ou équivalente dans chaque couple et dans le voltamètre, ainsi que le prouve l'expérience, et la seule différence c'est que le couple renferme un ou deux corps qui, en vertu de leur affinité chimique pour les éléments du liquide dont il est chargé, déterminent la formation de la chaîne polaire, laquelle ne continue dans le voltamètre que parce que la polarité y est transmise par l'intermédiaire des électrodes et des conducteurs métalliques au moyen desquels ils communiquent avec les couples. On peut donc considérer les voltamètres comme des couples inactifs introduits dans le circuit, et on doit remarquer que leur introduction affaiblit le courant, non-seulement parce qu'elle occasionne une résistance de plus comme le ferait l'introduction de tout autre conducteur additionnel, mais parce qu'elle crée une force électromotrice contraire à celle du couple ou de la pile voltaïque elle-même. En effet, dès qu'un voltamètre ou couple inactif est interposé dans le circuit, la décomposition du liquide dont il est chargé détermine une polarité secondaire sur les surfaces de chacun de ses électrodes; polarités dont l'effet est de produire un courant dirigé en sens contraire de celui qui les a déterminées. C'est donc une force électromotrice créée par l'action même du courant qui doit être retranchée de la force électromotrice du couple ou de la pile, quand on veut reconnaître la force électromotrice réelle du courant qui parcourt le circuit.

Mais ce n'est pas seulement dans les voltamètres que se développe cette force électromotrice contraire; elle se produit aussi dans les couples eux-mêmes, quand le circuit est fermé depuis quelques moments. En effet, dans chaque couple il y a un métal actif, le zinc ordinairement, et un métal inactif, platine ou cuivre; pendant que le circuit est fermé, le zinc s'oxyde, puis se dissout à l'état de sulfate, en supposant que le liquide excitant soit une dissolution d'acide sulfurique, du moins tant que le liquide est encore acide et n'est pas saturé de sulfate; mais le platine ou le cuivre se recouvrent soit d'hydrogène, soit de zinc ou d'oxyde de zinc provenant de la décomposition d'abord de l'eau acidulée, ensuite du sulfate dissous. Or ces dépôts impriment au métal sur lequel ils ont lieu une polarité secondaire dont l'effet est

de faire naître un courant dirigé dans un sens contraire à celui du courant que doit produire l'action du zinc sur le liquide, et par conséquent de diminuer notablement cette dernière. Comme ces polarités secondaires sont produites également sur le métal inactif de chaque couple, elles s'ajoutent les unes aux autres comme s'ajoutent les actions électromotrices des zincs, et celles-ci peuvent dans certains cas être assez amoindries pour finir par devenir nulles. La pile alors n'exerce plus d'action; c'est ce qui arrive aux piles qui ont été pendant quelque temps en activité, ainsi que l'ont reconnu tous les expérimentateurs, parmi lesquels nous citerons M. Marianini, qui a fait une série d'expériences sur l'affaiblissement qu'éprouvent les piles voltaïques pendant que leur circuit est fermé durant un temps plus ou moins long, et sur le temps pendant lequel il faut laisser leur circuit ouvert pour qu'elles recouvrent tout ou partie de la force qu'elles ont perdue. En général, c'est dans les premiers moments où le circuit vient d'être fermé ou ouvert, que la diminution ou l'augmentation de la puissance sont les plus prononcées; puis il arrive un moment où la puissance de la pile ne diminue ou n'augmente plus. Un fait assez important et qui aurait dû mettre M. Marianini sur la voie de la cause des phénomènes qu'il avait observés, c'est que l'affaiblissement n'a lieu dans une pile qu'autant que son circuit est fermé, et qu'il suffit même que ses pôles ne soient pas bien isolés pour qu'il se manifeste. Il varie avec la nature des couples et principalement avec celle du métal inactif. M. Marianini a remarqué qu'il avait lieu également avec des piles sèches dont on réunissait les pôles au moyen d'une bande de plomb. Deux piles de Zamboni de 1500 couples chacune, ayant eu leurs pôles ainsi réunis, on vit déjà au bout d'une minute leur tension mesurée à la divergence des feuilles de l'électroscope, descendre de 14° à 6° et au bout de 20 minutes à 2°. Le circuit ayant été rouvert au bout de 21 minutes, la tension était revenue à 14°. Des contacts répétés et rapprochés produisent le même effet qu'une communication continue. Enfin, il est facile de rendre à une pile la force qu'elle a perdue en la faisant traverser par le courant d'une autre pile, mais dirigé en sens contraire du sien. Tous ces effets sont

une conséquence naturelle de la polarisation qu'occasionnent sur les plaques inactives des couples, les dépôts provenant de la décomposition électrolytique de leur liquide; dépôts qui disparaissent, du moins en partie, par l'action dissolvante du liquide quand le circuit est ouvert, et qui sont détruits encore mieux par la formation de dépôts de nature contraire, que détermine un courant inverse transmis à travers la pile. Il est facile de s'assurer de l'exactitude de cette explication, en examinant de près ces plaques et en s'en servant pour former des couples avec des plaques semblables, mais qui n'ont pas servi; elles jouent toutes le rôle de métal positif par rapport à ces dernières.

L'effet que détermine sur le courant d'une pile l'interposition entre ses couples de diaphragmes métalliques, soit couples inactifs, tient à la même cause que celle qui résulte de la polarisation des métaux inactifs ou des lames d'un voltamètre; un voltamètre, comme nous l'avons dit, n'étant lui-même qu'un couple inactif interposé entre les deux métaux d'un couple actif. Aussi l'influence de la nature des substances dont sont faits les couples inactifs s'explique-t-elle très-bien, la diminution que leur interposition fait éprouver au courant étant en rapport avec la facilité qu'ils ont à conserver les dépôts qui se forment à leur surface; ainsi ceux sur lesquels le liquide exerce une action chimique n'arrêtent presque pas le courant, parce que les dépôts se dissolvent à mesure qu'ils se forment. Au reste, nous avons déjà démontré que c'était là la véritable cause de la résistance au passage, par les expériences, au moyen desquelles nous avons prouvé que cette résistance s'affaiblit et devient même nulle quand on fait usage de courants alternatifs et se succédant très-rapidement, avec lesquels la formation des dépôts est impossible [1].

L'une des causes qui contribuent le plus à diminuer la polarité secondaire des plaques inactives des couples dont se compose une pile en activité, c'est la présence de l'oxygène. Déjà, en 1801, Pepys, et plus tard Biot et Cuvier, avaient montré, en plaçant une pile à colonne surmontée d'une cloche, qu'il y avait absorption d'oxygène si les pôles de la pile étaient réunis, et

[1] Tome II, pages 342 et suiv.

que dans le vide ou dans l'azote le courant de cette pile était fortement affaibli. On avait attribué cette influence de l'oxygène à ce que sa présence facilite l'oxydation du métal attaquable du couple; mais dernièrement, M. Adie et après lui M. Viard ont démontré par des expériences exactes et nombreuses que c'est par son action sur la plaque négative ou inactive du couple, que l'oxygène exerce son influence. Ainsi quand deux plaques du même métal sont mises l'une dans de l'eau bouillie, l'autre dans de l'eau qui renferme de l'oxygène en dissolution, les deux liquides étant séparés par une cloison poreuse, c'est toujours la seconde plaque qui est négative par rapport à la première. Ce résultat, d'accord avec ceux que nous avons vu avoir été obtenus déjà par Matteucci et par Grove, s'explique de la même manière que l'établissement du courant dans la pile à gaz, la polarisation des molécules successives du liquide et leur décomposition et recomposition étant facilitées par la présence de l'oxygène sur l'une des lames, qui détermine le sens de la polarisation et par conséquent celui du courant. Mais l'influence de l'oxygène est bien plus marquée quand les couples sont formés de deux métaux différents; c'est ce que M. Viard a constaté avec diverses combinaisons voltaïques, telles que *zinc* avec *platine*, *argent*, *cuivre* et *fer*; *fer* avec *platine*, *argent* et *cuivre*; *cuivre* avec *platine* et *argent*, et enfin *argent* avec *platine*. Différents liquides ont été employés pour électrolytes, en ayant soin dans chaque cas de les placer dans deux compartiments dont l'un renfermait le liquide privé autant que possible d'oxygène, tandis que l'autre contenait le même liquide aéré avec l'oxygène. Les expériences ont été faites de la même manière que lorsque les lames étaient homogènes, savoir, en plongeant l'une des lames dans le liquide privé d'air et l'autre dans le liquide aéré; c'était toujours la présence de l'oxygène sur la lame négative qui augmentait la force du courant, augmentation due évidemment à l'absence de polarité secondaire pour cette lame, à cause de l'absorption opérée par l'oxygène sur l'hydrogène naissant à mesure qu'il était dégagé à sa surface par le courant.

Pour mesurer et comparer l'absorption de l'oxygène qui a

lieu dans les couples de nature différente, M. Viard a combiné son appareil de manière que l'électrolyte pût être à l'abri du contact de l'air; puis, plaçant au-dessus de chacun des éléments du couple une petite cloche graduée remplie d'oxygène, il a pu déterminer les absorptions, soit dans le cas où le circuit était fermé, soit dans celui où il restait ouvert. Les couples successivement soumis à l'expérience étaient des couples *zinc-platine, zinc-argent, zinc-cuivre* et *zinc-fer;* les électrolytes étaient successivement, avec chaque couple, de l'eau pure, des dissolutions de sulfate de potasse et de chlorure de sodium; les expériences duraient de vingt à vingt-cinq jours avec l'eau pure, et seize heures seulement avec les autres liquides. Voici le résultat de l'absorption mesurée par l'élévation du liquide dans le tube rempli d'oxygène pour deux des couples choisis aux deux extrémités de l'échelle :

	ZINC-PLATINE.		ZINC-FER.	
Electrolyte.	Circuit fermé.	Circuit ouvert.	Circuit fermé.	Circuit ouvert.
Eau.	18,0	3,0	14,0	12,0
Sulfate de potasse. . .	33,5	0,5	16,0	8,0
Chlorure de sodium. .	29,0	0,5	14,0	7,5

On voit que la différence entre l'absorption, quand le circuit est fermé, et l'absorption quand il est ouvert, est plus grande avec les dissolutions salines qu'avec l'eau pure; elle est d'autant plus considérable, ainsi que l'absorption elle-même, que la lame négative est moins oxydable. L'absorption n'a pas lieu seulement à la lame négative, mais elle a également lieu à la positive, avec cette différence qu'elle y reste sensiblement la même, que le circuit des couples soit ouvert ou fermé. L'absorption à la lame négative doit dépendre de l'intensité du courant; aussi varie-t-elle avec la nature du couple et avec celle de l'électrolyte. Avec un couple zinc-fer, chargé d'eau pure, et qui, par conséquent, est très-faible, l'ouverture du circuit n'a aucune influence sur l'absorption, celle-ci ayant lieu presque exclusivement sur la lame positive, tandis qu'avec un couple zinc-platine, chargé avec une dissolution de sulfate de potasse, et dont le courant est très-fort, ce qui permet une expé-

rience très-courte, l'absorption est considérable quand le circuit est fermé, et presque nulle quand il est ouvert, vu qu'alors elle n'a lieu que sur la lame positive.

Il résulte donc de tout ce qui précède, que la cause du prompt et grand affaiblissement qu'éprouvent les piles voltaïques, quand leur circuit a été fermé pendant quelques moments, n'est pas tant la diminution dans la faculté excitante du liquide dont elle est chargée, c'est-à-dire dans l'énergie de l'action chimique exercée sur le métal oxydable, que la création d'une polarité contraire sur le métal négatif ou inactif par l'effet de dépôts provenant de la décomposition électrolytique du liquide, principalement de l'hydrogène.

Voyons maintenant comment, en partant de ces principes, nous pourrons donner une explication satisfaisante des propriétés qui caractérisent chaque espèce de pile, et plus particulièrement les piles à courant constant. Nous ne reviendrons pas sur les détails de construction des diverses piles voltaïques, détails que nous avons exposés dans le chapitre second de notre première partie; nous les regarderons comme connus dans l'analyse que nous allons faire des circonstances qui influent sur le pouvoir de ces appareils.

Les premières piles à colonnes [1], ainsi que celles à auge de bois, à couronne de tasse, à auge de terre de pipe ou de cuivre [2], sont, comme on se le rappelle, composées de couples zinc-cuivre chargés avec un seul liquide, savoir, une dissolution acide ou saline. Toutes présentent l'inconvénient de s'affaiblir très-promptement quand leur circuit est fermé, par l'effet de la polarisation de leurs plaques négatives. On atténue cet inconvénient, soit en prenant pour liquide excitant une dissolution d'acide sulfurique dans laquelle on mélange un peu d'acide nitrique, soit en donnant aux lames négatives une surface beaucoup plus grande qu'aux positives. Ces deux modifications, apportées aux premiers modes usités pour charger et construire la pile, avaient été introduites em-

[1] Tome I, page 28, figure 17.

[2] Tome I, page 34 (fig. 25); page 35 (fig. 26); page 36 (fig. 27); page 37 (fig. 28 et 29); et page 38 (fig. 30 et 31).

piriquement, l'expérience en ayant fait reconnaître les avantages; maintenant, il est facile d'en comprendre l'utilité, en remarquant que la présence de l'acide nitrique dans le liquide excitant, facilite la dissolution partielle du dépôt sur la plaque négative, et que l'étendue donnée à cette plaque diminue sur chaque partie de sa surface la quantité de ce dépôt.

A ces perfectionnements, Faraday en avait ajouté quelques autres; il avait, comme le docteur Hare l'avait indiqué le premier[1] dans son calorimoteur, rapproché le zinc et le métal négatif (cuivre ou platine), autant que possible l'un de l'autre, en se contentant de séparer les deux métaux pour éviter tout contact entre eux par une feuille de papier. Du reste, comme dans la pile de Wollaston[2], le cuivre fait le tour du zinc, et un morceau de bois ou de liége empêche la partie inférieure du cuivre de toucher l'arête inférieure de la plaque de zinc. Non-seulement les zincs sont très-rapprochés des cuivres dans chaque couple, mais les couples eux-mêmes sont aussi très-voisins, et leurs cuivres sont également préservés du contact métallique par plusieurs feuilles de papier. Mais la plus grande modification apportée par Faraday est de plonger toute la pile dans le même liquide, et non pas chaque couple dans une auge séparée. Sans doute l'effet est un peu affaibli parce qu'une partie des électricités se recompose à travers le liquide, qui baigne également tous les couples; mais cette recomposition est très-faible par rapport à celle qui se fait à travers le conducteur qui réunit les deux pôles de la pile, pourvu que le liquide excitant ne soit pas une dissolution trop acide et par conséquent trop conductrice. L'expérience a montré qu'il n'y avait pas une différence bien sensible, en ce qui concerne surtout l'incandescence des fils métalliques, qui exige l'emploi de bons conducteurs, entre deux piles de 40 couples exactement semblables, sauf que dans l'une le liquide excitant était dans des auges séparées pour chaque couple, et que dans l'autre il était dans une auge unique. Du reste, l'emploi de cette pile est fort commode, vu que rien n'est plus facile que d'immerger et

[1] Tome I, page 38, figure 30.
[2] Tome I, page 37, figure 28.

d'émerger promptement les couples métalliques, ce qui fait qu'on ne consomme que peu de zinc, et que de plus la pile n'occupe que très-peu de place à cause de la proximité des plaques dont elle est formée. Comme les plaques de zinc sont très-minces, on peut les faire en zinc laminé, qui est très-supérieur au zinc fondu. MM. Young et Munch ont modifié la pile de Faraday en remplaçant le zinc ordinaire par le zinc amalgamé, et en la disposant de façon que chaque zinc se trouve toujours entre deux surfaces du même cuivre; le tout combiné de manière à occuper le moins de place possible, de telle sorte que dans la pile de Munch 50 couples occupent à peine 3 décimètres de longueur.

La pile de Smee est encore, comme celle de Faraday, une pile dans laquelle il n'y a qu'un liquide interposé entre les métaux des couples, mais le zinc y est amalgamé, ce qui évite toute action locale, et l'élément négatif y est recouvert d'une couche de platine très-divisé, comme le sont les lames de platine platinées de la pile à gaz de Grove. Cette dernière circonstance facilite singulièrement le dégagement de l'hydrogène, et par conséquent le développement de la force électromotrice du couple, en diminuant ou annulant presque complétement la polarité secondaire du métal négatif. Ainsi, une même plaque de zinc amalgamé mise successivement en contact dans l'acide étendu avec du platine platiné et du platine poli, mais chauffé pour chasser l'air de sa surface, dégage dans une minute sur le premier cinq fois plus de gaz hydrogène que sur le second. Tous les autres effets du courant sont accrus dans la même proportion. M. Smee place dans sa pile la lame platinée entre les deux faces verticales d'une lame de zinc amalgamé comme dans la pile à acide nitrique de Grove; mais comme il n'y a ni deux liquides, ni auge poreuse, il rapproche beaucoup les deux faces de zinc en donnant à ses couples la forme de ceux de la pile de Wollaston [1]. La lame de platine platiné peut, sans inconvénient, n'avoir que les 2/3 de la largeur des faces de la lame de zinc.

[1] Tome I, page 37, figure 28.

La pile de Smee se charge ordinairement avec une dissolution de 1 partie d'acide sulfurique pour 7 d'eau. Son effet est beaucoup plus constant qu'on n'aurait pu s'y attendre d'une pile à un seul liquide, et avec un nombre égal de couples à surfaces égales, elle a un effet très-supérieur à celle de Daniell à sulfate de cuivre. Smee, par motif d'économie, emploie dans sa pile au lieu de platine de l'argent platiné ; mais l'argent se prête mal, à cause de son poli, à l'opération du platinage. C'est pourquoi M. Boquillon a imaginé de se servir d'une lame de cuivre sur laquelle il dépose d'abord une couche de cuivre de manière qu'il soit rugueux et couvert d'aspérités, puis il recouvre cette première couche d'une couche d'argent qui participe au même état superficiel, et c'est sur cette couche d'argent qu'il dépose enfin le platine pulvérulent, qui en y adhérant donne à la lame au plus haut degré la propriété de dégager librement l'hydrogène.

M. Poggendorff a réussi également à donner aux couples formés d'une plaque de zinc amalgamé et d'une plaque de cuivre plongées dans de l'acide sulfurique étendu, une constance et une force remarquables en recouvrant la plaque de cuivre d'une couche pulvérulente de cuivre, semblable à celle de platine dont Smee recouvre ses lames négatives.

Mais la plus sûre manière d'éviter toute polarité sur la lame négative est de la plonger dans un liquide qui absorbe l'hydrogène au moment et à mesure qu'il s'y dégage [1], et qui empêche également un dépôt sur cette lame, de zinc ou d'oxyde de zinc, provenant de la décomposition électrolytique du sel qui est formé dans l'action sur le zinc amalgamé du liquide qui l'attaque. Daniell a eu le premier l'idée de ce perfectionnement en faisant l'application à la construction des couples d'une pile voltaïque, des effets électro-chimiques qui ont lieu dans deux liquides séparés par une membrane poreuse, et que M. Becquerel avait déjà trouvés et décrits. Ce physicien avait en effet déjà observé soit dans sa pile à gaz oxygène, soit dans un couple formé

[1] Un autre avantage de l'absorption de l'hydrogène est d'éviter l'obstacle mécanique que l'apparition des bulles de gaz oppose à la libre circulation du courant.

Digitized by Google

de deux lames, l'une de zinc, l'autre de cuivre, plongées dans deux compartiments distincts remplis de divers liquides excitants et séparés par un diaphragme de baudruche, qu'on peut obtenir des courants beaucoup plus constants que lorsqu'on emploie un seul liquide. Ainsi il avait obtenu un courant assez fort et passablement constant en mettant dans la case où était le cuivre, du nitrate de cuivre, et dans celle où était le zinc, du sulfate de zinc; avec de l'acide sulfurique très-étendu d'eau dans les deux cases également et quelques gouttes d'acide nitrique dans la case cuivre, il avait réussi à produire un effet assez constant tenant à l'action de l'acide nitrique, comme nous l'avons déjà fait remarquer en parlant de l'avantage qu'on avait reconnu à charger les anciennes piles avec une dissolution d'acide sulfurique renfermant un peu d'acide nitrique.

Daniell a donc imaginé de construire un couple et par conséquent une pile dans laquelle, tout en laissant le zinc dans une dissolution d'acide sulfurique ou de sel ordinaire, il plonge le cuivre dans une dissolution concentrée de sulfate de cuivre; les deux liquides sont séparés par un diaphragme poreux, fait d'une substance organique, telle que de la vessie, de la baudruche, de la toile serrée ou du bois, ou simplement formé avec de la terre dégourdie et non vernie. Nous avons déjà donné la description de cette pile[1]. Nous nous bornerons donc à reproduire ici (fig. 324) un couple à sulfate de cuivre, tel que Daniell le construisit dans l'origine. A B est un cylindre de cuivre qui sert en même temps de vase et de métal négatif; les deux bases de ce cylindre sont percées en E F et en *a b* de deux ouvertures circulaires auxquelles est fortement attaché par ses deux extrémités un tube en membrane poreuse qui n'est autre chose qu'un intestin de bœuf convenablement préparé, dans l'intérieur duquel on place un cylindre de zinc amalgamé C *d*. Il part

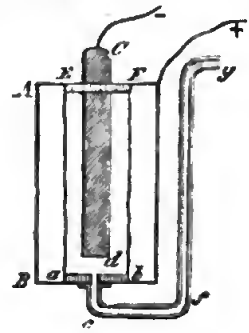


Fig. 323.

[1] Tome I, page 40.

de l'ouverture inférieure au centre de *a b*, un tube en syphon *e f g* destiné à donner écoulement au liquide contenu dans le cylindre membraneux quand on en ajoute du nouveau. Il faut avoir soin de maintenir au-dessus de la dissolution de sulfate de cuivre, pour qu'elle reste toujours aussi concentrée que possible, des cristaux de ce sel. Malgré quelques avantages que semblait d'abord présenter ce mode de construction, on préfère assez généralement le système que nous avons décrit dans notre premier volume [1].

La pile de Daniell présente, comme toutes celles où le zinc est amalgamé, l'avantage qu'il n'y a aucune action chimique quand elle ne fonctionne pas; mais ce qui la caractérise essentiellement, c'est que son effet est constant, parce que le cuivre ne se polarise pas. En effet, quand le circuit est fermé, l'hydrogène qui résulte de la décomposition de l'eau acidulée sur la surface du zinc, rencontrant le sulfate de cuivre au delà de la membrane poreuse, se combine avec l'oxygène de la première molécule de ce sulfate, de sorte que c'est le sulfate qui est maintenant décomposé [2], et que c'est son cuivre qui va se déposer en formant une couche mince sur le cuivre du couple; celui-ci n'est donc point altéré ni par conséquent polarisé. Il est vrai que lorsque la solution de sulfate étant un peu épuisée est devenue passablement acide, c'est alors l'eau acidulée qui est décomposée et non plus le sulfate, d'où résulte que de l'hydrogène se dégage sur la surface du cuivre; mais pour peu qu'il reste du sulfate dans la dissolution, ce sulfate est réduit par l'hydrogène naissant, et c'est encore un dépôt de cuivre qu'on obtient; seulement il est granuleux, au lieu d'être uni, brillant et ductile, ce qui diminue déjà un peu la force du courant; puis quand la dissolution est tout à fait épuisée, l'hydrogène se dépose sur le cuivre même, et alors le courant perd sa constance. C'est

[1] Il y a de l'avantage dans la pile de Daniell, où les cuivres et le sulfate de cuivre sont toujours placés extérieurement, à donner aux cylindres de zinc qui plongent dans les tubes poreux remplis d'une dissolution d'acide sulfurique, la forme de cylindres creux au lieu de celle de cylindres pleins, afin qu'ils présentent plus de surface à l'action du liquide.

Voyez tome II, page 326.

pourquoi il est très-important de maintenir autant que possible la dissolution de sulfate de cuivre à l'état de saturation. L'effet utile dans la pile de Daniell est tout entier dans l'action du zinc sur le liquide excitant qui le baigne; car le cuivre n'exerce pas d'action sensible sur son sulfate, ainsi que le prouve l'expérience; la décomposition de ce sulfate ne peut donc être une source électrique, mais simplement l'effet du courant produit par la réunion des deux électricités dégagées sur le zinc; effet qui, par le dépôt du cuivre qu'il occasionne, produit la constance de l'appareil[1].

M. Buff a apporté à la pile de Daniell une modification qui lui donne une constance remarquable et bien précieuse pour les recherches qui, sans exiger une grande force de courant, requièrent que cette force reste aussi constante que possible pendant un temps passablement long. Cette modification consiste à renouveler constamment le sulfate de cuivre, et en même temps à faire que le zinc amalgamé ne s'enfonce dans son liquide qu'à mesure qu'il s'use, ce qu'on obtient au moyen d'un contrepoids.

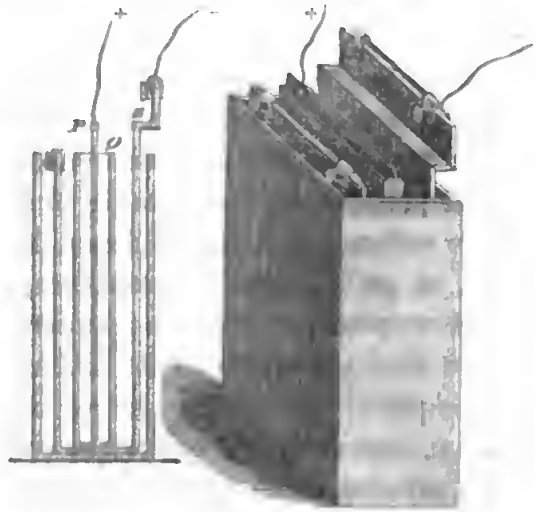


Fig. 324.

Les choses ne se passent pas exactement de même avec la pile de Grove, dans laquelle le sulfate de cuivre est remplacé par l'acide

[1] Voyez tome I, page 42, figure 328. Dans la figure 34, le zinc et le platine

nitrique, et par conséquent le cuivre par du platine (fig. 324). Outre que l'acide nitrique étant beaucoup plus conducteur que la dissolution de sulfate de cuivre, le courant est plus facilement transmis, il est probable qu'ici la facilité avec laquelle l'acide nitrique abandonne son oxygène, tend à décomposer l'eau acidulée en lui enlevant son hydrogène; il suffit en effet de plonger dans une dissolution d'acide sulfurique deux lames de platine, après avoir eu soin d'humecter auparavant l'une d'elles d'une couche d'acide nitrique, pour obtenir un fort courant dans lequel la dernière joue le rôle de métal négatif. Ainsi donc non-seulement l'acide nitrique, en empêchant par son contact avec la lame de platine, le dépôt de l'hydrogène naissant et par conséquent la polarité secondaire, rend le courant constant, mais en même temps il contribue à en augmenter l'intensité, comme le font le peroxyde de plomb et en général les substances qui renferment beaucoup d'oxygène. Un inconvénient réel de la pile à acide nitrique de Grove, c'est que sa constance ne dure pas longtemps; si son circuit est fermé quelques moments de suite sans interruption, pour peu que le conducteur qui réunit ses pôles soit bon, on voit des vapeurs nitreuses s'échapper des vases poreux où est l'acide nitrique, cet acide lui-même changer de couleur et devenir bouillant; et alors il faut arrêter l'action de la pile. On peut atténuer cet inconvénient en mêlant un peu d'acide sulfurique concentré (la moitié ou le tiers) avec l'acide nitrique, ou même prendre, au lieu d'acide nitrique de 1,40, de l'acide nitrique mélangé avec moitié d'eau. Mais le courant perd en intensité ce qu'il gagne en constance, surtout si on emploie le second moyen, car avec le premier, qui est bien préférable, la force n'est pas sensiblement diminuée. On a proposé encore de remplacer l'acide nitrique par du peroxyde de manganèse mélangé avec de l'acide sulfurique concentré; mais on n'a pas obtenu par ce procédé de résultats satisfaisants.

La pile de Bunzen, dans laquelle le platine est remplacé par

sont unis métalliquement par une lame mince en laiton munie de crochets et de vis de manière à former une pince. Dans la figure 33 du tome I, elles sont simplement unies par une pince en bois ou en liége.

du charbon (fig. 325)[1], ne présente pas au même degré l'inconvénient que nous venons de signaler dans la pile de Grove; cela tient à ce que le charbon étant moins conducteur que le platine, le courant qui resulte de la fermeture du circuit est

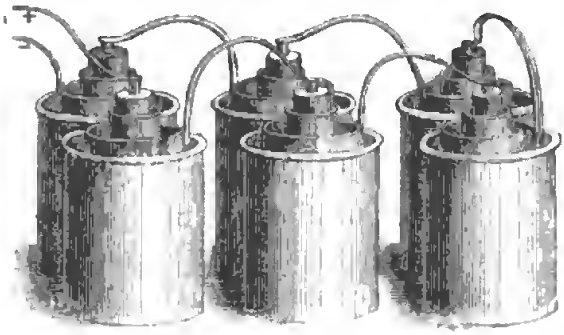


Fig. 325.

moins violent. Cependant au bout d'un temps un peu plus long seulement, ce qui tient aussi à ce que la masse de l'acide y est en général plus considérable, on voit les vapeurs nitreuses

[1] Tome I, page 43, figure 34, et p. 44, figure 35.

M. Silliman emploie comme charbon, dans la pile de Bunzen, de la plombagine naturelle ou de la plombagine artificielle, telle que celle dont on fait les creusets. De simples morceaux de coke bien choisis peuvent également servir avec avantage.

Voici du reste comment M. Bunzen prépare ses charbons :

On prépare d'abord un mélange intime et en poudre impalpable de 1 partie de houille grasse (en poids), et de 2 parties de coke. Ce mélange est introduit dans un moule de tôle cylindrique, au centre duquel on place un petit rouleau de carton, de 1 centimètre de diamètre, afin de ménager dans le charbon une cavité intérieure, et de faciliter le dégagement des gaz pendant la calcination. Ainsi rempli du mélange de charbon, et fermé au moyen d'un couvercle mobile bien assujetti, le moule de tôle est chauffé au rouge jusqu'à ce que tout dégagement de gaz ait cessé. Après cette calcination, le charbon est facilement retiré du moule sous forme compacte, cylindrique comme le moule, très-dur et susceptible de se prêter au travail de la lime et de la scie sans se briser ; le tourneur peut donner à ces cylindres la forme convenable. Cela fait, il est bon de tremper à plusieurs reprises les cylindres de charbon dans une solution de mélasse concentrée, et de les soumettre à une nouvelle calcination aussi intense que possible. On peut calciner plusieurs éléments ensemble dans un grand creuset de terre ou de fer, les interstices étant remplis de coke pulvérisé.

Enfin, avant de plonger le charbon dans l'acide nitrique, il est indispensable de recouvrir d'une couche de cire fondue le collet sur lequel on a adapté l'anneau ou la tige métallique destinée à établir la communication nécessaire entre

s'élever et l'acide entrer en ébullition. Aussi faut-il prendre également la précaution de ne pas mettre l'acide nitrique pur, mais bien de le mélanger avec de l'eau. On peut même se contenter de plonger les charbons, quand ils ont séjourné longtemps dans l'acide nitrique, dans une dissolution d'acide sulfurique dont on remplit les tubes poreux. L'acide nitrique dont les charbons sont imprégnés suffit assez longtemps pour accroître la puissance et maintenir la constance des couples [1].

Cette propriété du charbon m'a servi à construire une pile dans laquelle l'oxygène lui-même peut, jusqu'à un certain point, remplacer l'acide nitrique. J'introduis (fig. 326) dans un tube poreux, au centre duquel est un fil de platine, du charbon bien recuit et par conséquent bon conducteur, réduit en poudre impalpable ; j'ai soin de le bien tasser ; puis je place le tube poreux ainsi rempli dans l'intérieur d'un cylindre de zinc

le charbon et le zinc, afin d'empêcher que, par l'effet de la capillarité, l'acide ne vienne à corroder le métal.

Après chaque expérience, l'acide nitrique peut sans inconvénient rester en contact avec les charbons. La cellule contenant l'acide sulfurique doit au contraire être enlevée, vidée et lavée à grande eau, ainsi que le cylindre en zinc.

[1] M. Callan a eu l'idée de remplacer par du plomb le platine et le charbon dans les piles de Grove et de Bunzen, et il a obtenu des résultats assez satisfaisants. Mais il a trouvé un grand avantage à recouvrir la lame de plomb d'une légère couche de platine ou d'or, au moyen des chlorures de ces deux métaux. Il est évident que ce serait une grande économie que d'employer pour les piles de Grove des lames de cuivre ou de plomb platinées, au lieu de lames de platine. M. Schoenbein a eu également l'idée d'employer, comme métal négatif du fer passif, et comme métal positif du fer ordinaire, le premier étant en contact avec l'acide nitrique, et le second avec la dissolution d'acide sulfurique. Il est assez curieux de voir le même métal, le fer, jouer à la fois le rôle de métal négatif et de métal positif. Toutefois, sous ce dernier rapport, le zinc amalgamé est très-préférable ; mais des cylindres creux en fonte, dont la paroi intérieure a été rendue passive, peuvent très-bien servir à la fois de métaux négatifs du couple et de vases dans lesquels on met l'acide nitrique, puis le tube poreux rempli de la dissolution d'acide sulfurique dans laquelle plonge le fer ou mieux le zinc amalgamé. Je me suis servi longtemps avec avantage de piles ainsi construites.

M. Callan s'est également servi dernièrement de fonte de fer pour construire avec du zinc amalgamé une pile à un seul liquide, chargée avec un mélange d'acide sulfurique et d'une dissolution saline. Il a obtenu de très-bons effets de cette disposition.

amalgamé qui, lui-même, est plongé dans la dissolution d'acide sulfurique. Une pile, de huit à dix couples, construite de cette manière et dont les cylindres de zinc n'avaient que cinq centimètres de hauteur et quatre de diamètre, m'a donné pendant huit jours sans interruption une décomposition de l'eau acidulée, non très-forte de 1 à 2 centimètres cubes par minute, mais très-constante. L'hydrogène, qui aurait polarisé le charbon dans chaque couple, disparaît par sa combinaison, à l'état naissant, avec l'oxygène que le charbon retient dans ses pores et qu'il prend à l'air atmosphérique. Quand la pile s'affaiblit, quelques gouttes d'acide nitrique versées sur la face supérieure du cylindre de charbon tassé, la raniment pour un temps assez long. Mais il arrive un moment où le sulfate de zinc, ayant pénétré dans la poudre de charbon, il faut démonter la pile pour laver à pleine eau cette poudre, ou, ce qui est plus simple, pour la changer. J'ai trouvé qu'on pouvait remplacer avec avantage dans cette pile les fils de platine par de petits cylindres de charbon d'un centimètre de diamètre environ, préparés comme ceux qui servent dans les piles de Bunzen, en ayant soin de les placer dans l'axe des tubes poreux avant de les entourer de la poudre de charbon, et d'y implanter un fil de cuivre destiné à établir la communication.

Wheatstone, comme nous le verrons dans l'instant, a employé avec succès dans ses recherches des couples dans lesquels il n'y a non plus qu'un liquide, mais en évitant le contact immédiat du métal positif avec ce liquide. Ce métal est dissous dans du mercure, de manière à former un amalgame liquide; l'amalgame lui-même est placé dans un petit tube poreux (fig. 326), et le tube est plongé dans la solution qui baigne le métal négatif, sulfate de cuivre, si ce métal négatif est du cuivre, chlorure de platine, si ce métal est du platine. Un fil de cuivre ou de platine est plongé dans l'amalgame pour soutirer l'électricité négative. L'affinité chimique qu'exerce sur l'oxygène ou sur le chlore de la dissolution le métal positif,

Fig. 326.

le zinc, par exemple, dissous dans le mercure, suffit pour déterminer la production d'un courant qui est passablement constant [1], cependant moins que dans les piles à deux liquides, car on aperçoit bientôt un peu de cuivre métallique dans l'amalgame, contre la paroi intérieure du tube poreux, quand la dissolution est du sulfate de cuivre, ce qui est dû à l'action locale du zinc sur le sulfate, qui réduit un peu de cuivre.

Dans toutes les piles à deux liquides, et même souvent dans celles où il n'y a qu'un liquide, on est donc appelé à employer des diaphragmes ou des tubes poreux qui, tout en empêchant le mélange des substances qu'ils séparent, permettent, en s'humectant, la communication électrique de s'établir entre elles. Ces diaphragmes, comme nous l'avons vu, sont de différentes espèces, et il n'est pas inutile, avant de terminer ce qui concerne les détails de construction des différentes piles, d'en dire quelques mots.

La baudruche et la vessie, à raison de leur peu d'épaisseur, sont les diaphragmes qui opposent le moins de résistance au passage du courant; mais les agents chimiques les détruisent promptement, et ils ont l'inconvénient de faciliter trop l'endosmose des liquides qui ne peuvent ainsi rester longtemps séparés. Aussi ce genre de diaphragme, qui peut être bon dans certaines expériences de recherches délicates, doit-il être rejeté dans la construction des piles usuelles. Le cuir et la peau tannés ont les mêmes inconvénients, mais à un degré moindre; cependant la préparation qu'il faut leur faire subir les altère quelquefois assez pour les rendre impropres à l'usage auquel on les destine. La toile à voile est meilleure, vu qu'elle n'a qu'un faible degré d'endosmose sur les dissolutions neutres; il faut quand on leur donne la forme de sac, que la couture soit faite avec un fil enduit de poix. Le papier ou carton goudronné un peu perméable aux liquides est un assez bon diaphragme; le goudron empêche le papier de se délayer dans l'eau. Mais en fait de diaphragmes organiques, ceux qui sont faits en bois

[1] Il faut que le sel en dissolution soit un sel dont la base soit le même métal que le négatif du couple, afin que le courant voltaïque, en le décomposant, n'altère pas la nature de la surface de ce métal négatif.

minces sont peut-être préférables à tous. Ainsi, pour la pile de Daniell, des cylindres creux en bois de tilleul à parois très-minces m'ont constamment donné de bons résultats. Il faut avoir soin, pour enlever les matières résineuses qui se trouvent dans le bois, surtout lorsque c'est de sapin qu'on fait usage, de le plonger pendant longtemps dans de l'eau bouillante alcalisée; puis il faut les conserver, quand on ne s'en sert pas, dans de l'eau légèrement acidulée; autrement ils se cambrent et se fendent en séchant, ce qui les rend impropres à leur destination.

Les diaphragmes inorganiques sont, en général, d'argile, ou mieux de kaolin : ce dernier, dépouillé de carbonate de chaux, forme à l'état de pâte un diaphragme auquel on peut donner beaucoup d'épaisseur, ce qui est avantageux pour éviter l'endosmose, pourvu qu'il soit bien imbibé d'un liquide bon conducteur et qu'il ne soit pas trop fortement tassé. Mais c'est surtout sous forme de vases, soit prismatiques comme dans les piles de Grove, soit cylindriques comme dans celles de Bunzen, que les diaphragmes inorganiques sont usités; on les fait en général de porcelaine dégourdie, mais ils offrent plus de résistance que la terre demi-cuite et que les creusets; ceux-ci sont fort commodes, parce qu'on peut s'en procurer facilement, seulement il faut avec la lime diminuer l'épaisseur de leurs parois, qui, généralement, est trop considérable. Il faut avoir soin de laver souvent tous ces diaphragmes, afin d'enlever les sels qui, pénétrant et cristallisant dans leur intérieur, finissent par faire éclater les parois. Il faut aussi veiller à ce que les diaphragmes ne renferment ni du charbon, ni des pyrites ou autres substances d'origine métallique qui, étant conductrices, établiraient entre les deux liquides que le diaphragme sépare, une communication d'une toute autre nature que celle qu'on a en vue, c'est-à-dire une communication métallique qui déterminerait une décomposition électro-chimique; c'est à la présence de ces substances hétérogènes qu'on peut attribuer l'apparition qui a lieu quelquefois sur la surface des diaphragmes, de dépôts métalliques réduits. Les substances organiques ne présentent pas ce genre d'inconvénient, mais elles ont celui de produire par elles-mêmes la réduction de certains métaux

quand elles plongent dans leurs dissolutions. En résumé, dans la pratique, c'est aux diaphragmes en porcelaine dégourdie qu'on a donné la préférence, quoiqu'ils présentent plus de résistance que les autres au passage du courant.

Nous ne nous arrêterons pas ici à la description de quelques autres piles plus ou moins constantes, telles que celles dans lesquelles le conducteur humide est simplement la terre, soit qu'on implante dans le sol humide, comme l'ont fait Bain, Loomis et d'autres, les deux métaux du couple, soit qu'on les place dans un vase rempli de terre qu'on arrose avec de l'hydrochlorate d'ammoniaque, comme dans la pile de Bagration[1]. Ces différentes piles ayant été constituées en vue des applications, leur description trouvera naturellement sa place quand nous parlerons de celles des applications auxquelles elles se rapportent. Nous renvoyons de même au § 7 de ce chapitre, où nous traiterons la question du contact, la théorie des piles sèches dont nous avons déjà donné la description[2].

Mais si, au point de vue de la forme, nous n'avons rien à ajouter à ce que nous avons dit, soit dans ce paragraphe, soit dans le § 5 du second chapitre de notre première partie[3], il est loin d'en être de même quant à la nature des substances solides et liquides qui constituent les couples; mais ce point important va être traité avec détail dans le paragraphe suivant, consacré à la mesure des forces électromotrices et à la comparaison, sous le rapport de leur puissance, des différentes combinaisons voltaïques entre elles.

Toutefois, avant d'aborder ce sujet important, nous avons encore à mentionner un procédé tout différent de ceux qui pré-

[1] Cette pile produit un courant d'une constance étonnante, ce qui provient soit de la réduction de l'hydrogène sur le cuivre, par le composé que forme sur ce métal le sel ammoniacal, soit par l'absorption de l'hydrogène par la terre elle-même, qui du reste fait l'office de diaphragme, et empêche ainsi un dépôt de zinc sur le cuivre. Il est bon de ne pas mettre les deux plaques du couple trop près l'une de l'autre, et de plonger la plaque de cuivre, avant de la mettre en terre, dans une dissolution de sel ammoniacal en la laissant sécher jusqu'à ce qu'il se soit formé une couche verdâtre à la surface.

[2] Tome I, page 52.

[3] Tome I, page 34.

cèdent, pour maintenir et augmenter la puissance des piles en détruisant les polarités secondaires; c'est celui que vient d'imaginer tout récemment M. E. Becquerel, et qui, s'il n'a pas toute la portée pratique à laquelle on aurait pu peut-être s'attendre, n'est pas sans intérêt au point de vue théorique. Le procédé consiste à donner aux couples d'une pile un mouvement assez vif dans le liquide qui les baigne. Ainsi M. E. Becquerel a obtenu avec un seul couple platine et zinc amalgamé une augmentation très-sensible par le fait du mouvement; ce couple en repos dans une dissolution de sulfate de soude à moitié saturée donnait à un galvanomètre peu sensible une déviation de 8°; quand on l'a mis en mouvement, la déviation est allée jusqu'à 20°. Cet effet est évidemment dû à ce que le mouvement dépolarise la lame de platine; cependant il y a de l'avantage à mouvoir aussi la lame de zinc, parce qu'on change ainsi les couches liquides qui baignent sa surface. Si l'on remplace par une dissolution d'acide sulfurique celle de sulfate de soude, l'effet du mouvement est beaucoup moins prononcé à cause du dégagement abondant de l'hydrogène sur le platine; mais il le devient davantage quand on met dans l'acide sulfurique étendu, du charbon bien pulvérisé de manière à en faire une pâte. Cette pâte facilite la dépolarisation du platine en absorbant l'hydrogène, en même temps qu'elle l'enlève par son action mécanique de frottement.

Voici une expérience qui donne l'idée de l'effet que peut produire la dépolarisation du métal négatif des couples d'une pile, opérée au moyen du mouvement. M. E. Becquerel a disposé une petite pile voltaïque de 10 couples formés de disques de zinc amalgamé et de cuivre de 10 centimètres de diamètre, portés par un axe de manière à pouvoir être mis en mouvement à l'aide d'une manivelle; leur surface était parallèle et à 1 centimètre de distance, et ils plongeaient dans des auges où l'on pouvait placer un liquide ou une masse pâteuse, de façon que leur circonférence ne pénétrât qu'à $1^{cent.},5$ de profondeur au-dessous de la surface du liquide. Deux conducteurs en cuivre portaient sur deux bassins en cuivre soudés aux deux disques de chaque couple fixés sur l'axe, de sorte que, lors du mouve-

ment des disques mêmes, un de chacun d'eux plongeait toujours dans le liquide, et l'on pouvait faire communiquer les deux disques entre eux.

La pile de 10 couples a été employée à décomposer l'eau, et l'on a mesuré l'hydrogène à l'électrode négatif à l'aide d'une mesure graduée par dixième de centimètre cube.

Liquide contenu dans les auges de la pile.	Etat des disques.	Volume d'hydrogène en cent. dégagé en 20'.
Eau saturée de sulfate de soude.	Repos.	6,25
	Mouvement.	46,75
Charbon de coke réduit en pâte liquide par de l'eau acidulée par de l'acide sulfurique au $\frac{1}{100}$.	Repos.	21,00
	Mouvement.	136,00

On voit que lors du mouvement l'effet de la pile a été sept fois plus considérable.

Il résulte cependant des recherches de M. E. Becquerel, que le mouvement est, indépendamment de la dépolarisation qu'il opère, un moyen de dégager de l'électricité. Ainsi, de deux lames de zinc plongées dans une même dissolution, celle qui est en mouvement devient négative par rapport à celle en repos qui demeure positive; il en est de même des autres métaux oxydables. Avec ceux qui ne le sont pas ou qui le sont moins, c'est l'inverse; ainsi, soit qu'on opère dans de l'eau distillée, soit qu'on se serve d'une dissolution acide ou saline, dans un couple composé de deux éléments semblables, platine ou charbon par exemple, c'est le mobile qui est positif par rapport au fixe, c'est-à-dire qui joue, par rapport à lui, le rôle de métal attaqué. Dans le premier cas, il est évident que le contact établi par le mouvement entre l'un des éléments du couple et l'oxygène de l'air, tend à le dépolariser en lui ôtant l'hydrogène adhérent à sa surface, et par conséquent à le rendre négatif; dans le second, il est possible que l'oxygène que prend à l'air l'élément mobile, aide le liquide dans lequel cet élément est ensuite plongé, à exercer sur lui une action chimique qui donne naissance au faible courant dont le galvanomètre accuse l'existence. Il se peut aussi que le simple frottement qui résulte

de l'agitation un peu vive de cet élément dans le liquide soit la source de cette électricité. Cependant, si d'un côté la présence de la poudre de charbon augmente l'effet, tandis que celle du sable dans le liquide ne l'accroît pas, il est difficile de voir là des effets de frottement. Nous serions plutôt disposés à attribuer tous ces phénomènes un peu compliqués à de petites réactions chimiques qui résultent de l'introduction de l'air dans le liquide sous l'influence des corps solides en mouvement. Ils seraient du même ordre que ceux que M. Becquerel le père avait déjà étudiés depuis longtemps, tels en particulier que ce fait curieux que, lorsqu'on termine les deux bouts du fil d'un galvanomètre par deux lames de platine plongeant dans de l'eau distillée et qui ne sont point polarisées, si on en retire une de l'eau et qu'on la replonge immédiatement, elle détermine un courant dans lequel elle est positive par rapport à l'autre.

§ 6. Mesure de la force électromotrice relative des diverses combinaisons voltaïques.

Nous avons vu[1] que l'intensité d'un courant peut être représentée par la formule $I = \frac{E}{R}$, E étant l'ensemble des forces électromotrices, c'est-à-dire productrices de l'électrité, qui sont en activité dans un circuit électrique, et R l'ensemble des résistances que ce circuit présente à la circulation du courant. Nous avons défini plus tard la force électromotrice d'un couple hydro-électrique, la force avec laquelle les molécules liquides qui entrent dans la formation de ce couple sont polarisées en vertu de l'affinité chimique[2]. Pour le moment nous nous bornerons à désigner sous ce nom, sans faire aucune hypothèse sur sa nature, la force qui produit l'électricité dans un circuit voltaïque, abstraction faite de la résistance que ce circuit présente. La force électromotrice peut donc être mesurée, ou par l'intensité du courant auquel elle donne naissance mulipliée par la résistance du circuit $E = I$

[1] Tome II, pages 19 et 20.
[2] Tome II, page 624.

$\times$ R, ou par la tension statique des extrémités du système hydro-électrique, le circuit étant ouvert. En effet, d'après ce que nous avons établi plus haut[1], la tension d'un couple ou d'une pile voltaïque n'étant qu'une décharge ou qu'un élément d'un courant, puisqu'elle est toujours accompagnée d'une action chimique correspondante, il ne doit pas y avoir de différence, quant à la force électromotrice, entre les deux formes de sa manifestation; seulement, comme la vitesse avec laquelle l'électricité se propage n'exerce pas sur l'intensité de la tension, puisqu'il y a accumulation d'électricité, la même influence que sur celle du courant, la résistance ne joue pas le même rôle dans l'expression de l'une ou de l'autre intensité. Nous verrons plus loin qu'on peut arriver exactement aux mêmes valeurs, pour l'expression de la force électromotrice relative des différentes combinaisons voltaïques, en l'évaluant, soit par l'intensité du courant, soit par celle de la tension auxquelles ces combinaisons donnent naissance. Mais comme les procédés fondés sur l'évaluation de l'intensité du courant sont d'une exécution beaucoup plus facile et plus susceptible d'exactitude, c'est à eux que nous nous attacherons de préférence.

Le premier de ces procédés est celui indiqué par Ohm lui-même, et qui consiste à mesurer les intensités du courant produit par une même source d'électricité, en introduisant dans son circuit, à côté de la résistance invariable tenant à la nature même de ce circuit, deux résistances variables; il est facile de conclure de la comparaison de ces deux intensités la force électromotrice de la source. Soit en effet $\left(i=\frac{e}{r+l}\right)$ et $\left(i'=\frac{e}{r+l'}\right)$, e étant la force électromotrice, r la résistance invariable, l et l' les deux résistances additionnelles[2], et i et i' les intensités correspondantes du courant, mesurées par le galvanomètre à sinus ou à tangente, on a, en égalant les deux

[1] Tome II, pages 615 et 616.

[2] Les résistances sont mesurées par des longueurs de fil, comme nous l'avons expliqué tome II, pages 22 et 28.

valeurs de e, $r+l=\frac{i}{i-i'}(l'-l)$ d'où $e=\frac{ii'}{i-i'}(l'-l)$)

en substituant à $r+l$ sa valeur dans la valeur de i ci-dessus. Cette valeur de e est donnée en fonction de la différence des longueurs du fil, ou des résistances additionnelles que le courant surmonte dans sa circulation.

Si l'on pouvait faire varier la force électromotrice au lieu de la résistance, d'une quantité connue, on obtiendrait de même la valeur de cette force ; mais ce procédé, qui serait praticable pour les circuits thermo-électriques où une simple élévation de température suffit pour changer cette force, ne l'est pas pour les combinaisons voltaïques ou hydro-électriques, dans lesquelles on ne peut modifier la force électromotrice, sans apporter en même temps un changement à la résistance.

Un second procédé, employé par Fechner, consiste, pour comparer deux forces électromotrices, à réunir deux couples différents dont les forces électromotrices sont e et e', de façon que leurs courants cheminent d'abord dans le même sens, ensuite en sens contraires, puis à mesurer la somme s et la différence d des intensités de leurs courants respectifs. On a en effet $s=\frac{e+e'}{r+r'}$ et $d=\frac{e-e'}{r+r'}$ d'où $\frac{e}{e'}=\frac{s+d}{s-d}$ en égalant les deux valeurs de $r+r'$. On suppose dans ce procédé que l'intensité du courant est proportionnelle à la somme ou à la différence des deux forces électromotrices, ce qui découle des principes que nous avons posés dans notre premier chapitre, et ce qui d'ailleurs est d'accord avec l'expérience, comme nous allons le voir. Quant à la résistance de la combinaison voltaïque qui résulte de la réunion des deux couples, elle est évidemment la somme des résistances de chacun des deux couples en particulier, de quelque manière qu'ils soient réunis.

Un troisième procédé, pratiqué également par Fechner, repose sur le principe que, si les résistances sont égales, les forces électromotrices sont entre elles comme les intensités des courants, conséquence de la formule qui exprime ces intensités. On parvient à cette égalité des résistances en ajoutant dans le

circuit de chacun des couples à leurs résistances respectives r et r', une résistance R très-grande par rapport à laquelle les deux autres puissent être regardées comme infiniment petites. On peut alors considérer dans les deux expressions $i = \frac{e}{r+R}$ et $i' = \frac{e'}{r'+R}$, les résistances $r+R$ et $r'+R$ comme sensiblement égales, d'où l'on tire :

$$e : e' = i : i'.$$

Pour appliquer cette méthode, M. Fechner emploie un galvanomètre à fil très-long dont l'introduction dans le circuit du couple détermine cette résistance R, infiniment grande par rapport aux résistances r et r'.

Ajoutons que, pour mesurer l'intensité du courant, M. Fechner emploie la méthode des oscillations d'une aiguille aimantée placée dans le voisinage du conducteur qui transmet le courant, méthode mise en pratique pour la première fois par MM. Biot et Savart [1].

M. Poggendorff a fait la remarque fort juste que l'application des trois procédés que nous venons de décrire, aux cas des combinaisons voltaïques à force non constante, et dans lesquelles, comme nous l'avons vu, l'intensité du courant va rapidement en diminuant, du moins quand les circuits sont fermés, rend toute mesure de ce courant difficile. Ce n'est pas tout; en supposant même qu'on arrive à un état assez constant du courant pour pouvoir le mesurer, on reconnaîtra dans le principe même des procédés, une objection très-forte contre l'exactitude des résultats qu'on veut en tirer. En effet, si on cherche à déterminer par la première méthode, celle de Ohm, la force électromotrice e, on trouve pour l'expression de cette force une valeur d'autant plus grande que la résistance absolue est plus considérable, ce qui tient à ce que le couple s'affaiblit d'autant moins vite que le circuit dont il fait partie est moins conducteur, les causes perturbatrices, telles en particulier que la polarisation du

[1] Tome I, page 211.

métal négatif, ayant d'autant moins de puissance. La résistance absolue r varie également par la même raison. On conçoit donc que le procédé est tout à fait illusoire, puisque les deux quantités supposées constantes dans la formule e et r varient avec les résistances additionnelles l et l' qu'on introduit. Il est vrai que cette variation des deux quantités e et r est d'autant moins considérable que la résistance totale est plus grande; c'est ce qui fait que Fechner a pu obtenir des résultats assez exacts par l'application de la troisième méthode, même aux cas des courants de force non constante. M. Poggendorff a du reste proposé, pour la détermination de la force électromotrice de ces courants, une méthode beaucoup plus exacte, qui est fondée sur un principe rigoureux : elle repose sur la théorie des circuits composés, c'est-à-dire formés de la réunion de deux ou plusieurs couples dans lesquels on admet, ainsi que cela résulte des expériences de Fechner, de Pouillet et de M. Poggendorff lui-même, et comme nous l'avons rappelé plus haut, que la force électromotrice d'un circuit composé est la somme ou la différence des forces électromotrices des circuits simples dont il se compose, et que sa résistance est de même la somme des résistances des circuits simples. La méthode de M. Poggendorff exige l'emploi d'un couple à force constante, tel qu'un couple de Grove, dont on a déterminé la force électromotrice par un des trois précédents procédés qui sont applicables dans ce cas, et on compense, au moyen du courant de ce couple, celui du couple à force non constante dont on veut déterminer la force électromotrice; c'est pourquoi cette méthode a reçu de son auteur le nom de *méthode de compensation*. Dans l'application de sa méthode, M. Poggendorff emploie deux procédés dont le second a sur le premier l'avantage de ne pas exiger une constance parfaite et très-prolongée du couple à force constante, condition difficile en général à réaliser, et de ne pas imposer la nécessité de connaître d'avance les deux éléments e et r de ce couple [1]. Toutefois, comme il importe néanmoins, même dans l'emploi

[1] Voyez pour les détails de la méthode de Poggendorff, la note finale F, qui est consacrée à l'exposition plus mathématique des différentes méthodes.

du second procédé, de savoir déterminer la force électromotrice d'un couple à force constante, et que d'ailleurs cette détermination est à la fois la plus simple et la plus importante dans la pratique, c'est par elle que nous commencerons, en nous servant pour cela d'une cinquième méthode qui est celle de Wheatstone.

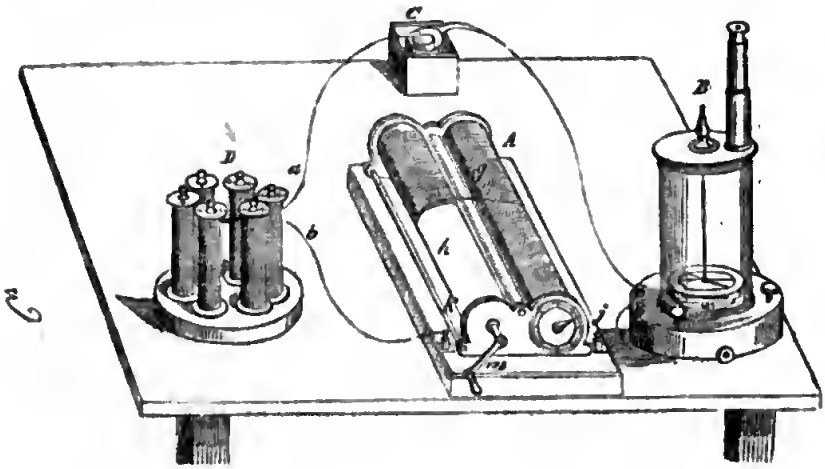
M. Wheatstone remarque d'abord que si dans un circuit on augmente dans le même rapport la force électromotrice et la résistance, l'intensité du courant ne change pas; ainsi $i=\frac{e}{r}=\frac{ne}{nr}$. Il suit de là qu'un seul couple voltaïque ou une pile composée d'un nombre quelconque de couples semblables doivent donner naissance à des courants de même intensité, pourvu qu'on introduise chaque couple avec sa résistance propre sans interposer aucune résistance additionnelle. Toute résistance nouvelle interposée diminue la force du courant, mais son effet est d'autant moindre qu'elle est plus petite par rapport à la résistance totale du circuit; d'où il résulte que si, dans deux circuits qui produisent des courants de force égale, mais dans lesquels les résistances, et par conséquent les forces électromotrices sont très-différentes, on introduit la même résistance, les intensités des deux courants seront affaiblies dans des proportions très-différentes aussi. C'est pourquoi la même résistance, celle provenant par exemple de l'introduction d'un voltamètre, affaiblit, dans une proportion bien plus considérable, l'intensité $i=\frac{e}{r}$ du courant provenant d'un seul couple, que l'intensité $i=\frac{ne}{nr}$ provenant du courant d'un circuit de n couples mis en série. Ces principes, qui découlent de ce que nous avons déjà dit plus haut, et en particulier dans le chapitre Ier de notre quatrième partie[1], expliquent pourquoi il faut employer une série de couples d'autant plus nombreuse que la résistance que le courant rencontre est plus considérable.

[1] T. II, pages 19 et suiv.

Après avoir rappelé les principes qui précèdent, voyons l'application que M. Wheatstone en a faite. Pour éviter d'avoir à mesurer les intensités variables des courants, soit par les galvanomètres à sinus ou à tangente, soit par le nombre des oscillations d'une aiguille aimantée, mesures peu susceptibles d'une exactitude rigoureuse, il introduit dans le circuit, au lieu de résistances constantes, des résistances variables, ramenant ainsi à l'égalité les courants produits dans les circuits dont on compare la force électromotrice; puis il conclut du total de la résistance additionnelle introduite dans chaque cas pour passer d'une certaine déviation de l'aiguille du galvanomètre toujours la même, de 45° par exemple, à une autre déviation de 40°, toujours la même aussi, les valeurs relatives des forces électromotrices et des résistances du circuit, selon les conditions particulières de l'expérience. Il n'est nullement nécessaire, dans cette méthode, de connaître les forces correspondantes aux déviations de l'aiguille.

M. Wheatstone, pour introduire dans le circuit une résistance variable, se sert du rhéostat dont nous avons donné déjà la description détaillée[1] : le fil de cuivre de cet instrument étant interposé dans le circuit, il suffit de l'allonger ou de le raccourcir d'une quantité qu'on peut mesurer avec la plus grande exactitude pour ajouter ou retrancher une résistance

[1] Tome II, page 29, figure 183. Nous en reproduisons ici la figure.



qui est exprimée en longueur de ce fil. Quand il s'agit de mesurer des résistances trop grandes pour que l'introduction du fil du rhéostat tout entier, quoiqu'il soit fort long, puisse amener le courant à ne dévier l'aiguille du galvanomètre que de la quantité voulue de 45° par exemple, on introduit dans le circuit des bobines de résistance qui sont disposées à côté du rhéostat, comme l'indique la figure, de manière à pouvoir en interposer un plus ou moins grand nombre. On parvient ainsi à réduire le courant à l'intensité de 45° en complétant, au moyen du rhéostat, ce qui manque à la résistance ajoutée pour atteindre exactement cette déviation; résistance du reste qu'il n'est point nécessaire de connaître, puisque ce qu'il s'agit de mesurer, c'est uniquement la longueur du fil du rhéostat qu'il faut ajouter pour que le courant passe dans chaque cas de l'intensité de 45° à celle de 40°.

Soit maintenant $i' = \frac{e}{r}$, i ayant été amené à produire 45° au galvanomètre avec le couple dont la force électromotrice est e, et la résistance r, soit l la longueur du fil du rhéostat qu'il faut ajouter à r pour que i devienne i', et ne produise plus que 40° au galvanomètre. On a $i = \frac{e}{r+l}$, soit maintenant une autre combinaison voltaïque dont la force électromotrice soit $e' = ne$. Pour que son courant n'ait que l'intensité i produisant 45°, il faudra que la résistance soit $r' = nr$, ce qu'on obtiendra au moyen des bobines de résistance; on aura en effet : i ou $\frac{e}{r} = \frac{ne}{nr}$; mais pour amener i à n'être plus que i', c'est-à-dire 40°, il faudra que la résistance additionnelle ou la longueur du fil du rhéostat ajoutée soit $l' = nl$; car puisqu'on a $i = \frac{ne}{nr}$ pour avoir $\frac{ne}{nr+l'} = i'$ ou $= \frac{e}{r+l'}$ il faut évidemment que l' soit égal à nl. Or, n est le rapport des deux forces électromotrices e et e'; on voit qu'il est le même que celui des deux quantités l et l' dont il faut allonger le fil du rhéostat pour faire passer de 45° à 40° les courants des deux couples dont les forces électromo-

trices sont e et e'; sa détermination est donc bien facile. Dans l'application que nous allons faire du procédé à la détermination des forces électromotrices de différentes combinaisons voltaïques, nous nous contenterons, pour exprimer les longueurs ajoutées du fil du rhéostat, d'indiquer le nombre de tours dont ce fil a été déroulé, chaque tour correspondant à une longueur de $8^{cent.},8$.

Trois couples, différents seulement par leurs dimensions, composés chacun d'un amalgame liquide de zinc placé dans une auge poreuse cylindrique, laquelle est plongée dans un vase rempli d'une dissolution de sulfate de cuivre où est également immergé un cylindre creux en cuivre, furent successivement placés dans un circuit dont le rhéostat faisait partie. Tous les trois exigèrent également 30 tours du rhéostat pour que leur courant fût amené de 45° à 40°. Cependant l'un avait $5^{cent.}$ de hauteur et $3^{cent.}$, 8 de diamètre; le second, $8^{cent.}$, 4 de hauteur et $6^{cent.}$, 35 de diamètre; le troisième, $15^{cent.}$ de hauteur et $8^{cent.}$, 4 de diamètre. Ainsi la force électromotrice est complétement indépendante de la grandeur des surfaces du couple; ce qui est une conséquence de la nature de cette force, ainsi que nous l'avons déjà remarqué.

Il n'en est pas de même de l'influence du nombre des couples. Il est facile de prouver que la force électromotrice croît proportionnellement à ce nombre, conformément à la théorie. Ainsi avec un circuit formé successivement de 1, 2, 3, 4 et 5 couples semblables au plus petit de ceux dont nous venons de nous servir, on trouve que pour amener le courant de 45° à 40°, il faut:

Avec 1	couple	30 tours.
2	couples	61
3	couples	91
4	couples	120
5	couples	150

On voit donc que, sauf pour les cas de 2 et de 3 couples, où il y a une légère différence provenant d'une petite erreur d'expérience, la loi se vérifie exactement.

Si nous passons maintenant à la détermination de la force électromotrice de couples de différentes espèces, nous trouvons d'abord un résultat assez remarquable, c'est que, lorsqu'on se borne à changer dans le couple, amalgame de zinc, sulfate de cuivre et cuivre, le sulfate, pourvu que ce soit toujours un sel de cuivre, en le remplaçant par l'acétate, le protochlorure, le nitrate ou le sulfate ammoniacal, on a les mêmes forces électromotrices, sauf en ce qui concerne le nitrate, qui donne un résultat variable, probablement à cause de l'action de l'acide nitrique sur le mercure. Un autre fait curieux, c'est que la proportion de zinc dans l'amalgame liquide ne paraît point affecter non plus la force électromotrice du couple; seulement l'action dure moins longtemps. Au fond c'est un résultat tout à fait semblable à celui qui nous a montré que l'influence sur la force électromotrice de l'étendue de la surface de contact entre les métaux du couple et le liquide dont il est chargé, est tout à fait nulle. La quantité de zinc dissoute dans l'amalgame détermine le nombre de points de la surface de cet amalgame susceptibles d'être attaqués par le liquide; elle produit donc, en variant, le même effet qu'une augmentation ou une diminution dans la surface du même amalgame, c'est-à-dire un effet nul sur la force électromotrice. Celle-ci n'étant en effet que la propriété du courant qui la possède de surmonter une résistance donnée, elle doit être la même pour chaque point ou chaque molécule de la surface attaquée; quant à la quantité absolue d'électricité qui passe, il est clair qu'elle varie avec le nombre des points attaqués, mais ce n'est pas elle que nous mesurons ici.

La plus grande force électromotrice que puisse avoir un couple voltaïque composé de deux métaux et d'un liquide interposé, est obtenue quand le liquide est une dissolution d'un sel ayant pour base le métal négatif. En effet, de cette manière on évite sur ce métal le dépôt de matières hétérogènes qui, en le polarisant, réduisent notablement la force électromotrice. Ainsi, en remplaçant dans le couple, amalgame de zinc, sulfate de cuivre et cuivre, le sulfate par de l'acide sulfurique étendu, on n'a plus que 20 tours du rhéostat au lieu de 30, pour l'expression de la force électromotrice. De même si on remplace,

dans un couple, zinc amalgamé, chlorure de platine et platine, le chlorure par de l'acide sulfurique étendu, on n'a plus que 27 tours au lieu de 40. Voici, du reste, un tableau des forces électromotrices de différents couples :

Amalgame de zinc, acide sulfurique étendu, cuivre. . .	20	tours.
— de zinc, acide sulfurique étendu, platine. . .	27	
— de zinc, sulfate de cuivre, cuivre.	30	
— de zinc, chlorure de platine, platine. . . .	40	
— de zinc, acide sulfurique étendu, peroxyde de manganèse.	54	
— de zinc, acide sulfurique étendu, peroxyde de plomb.	68	
— de potassium, sulfate de zinc, zinc. . . .	29	
— de potassium, sulfate de cuivre, cuivre. . .	59	
— de potassium, chlorure de platine, platine. .	69	
— de potassium, acide sulfurique étendu, peroxyde de manganèse.	84	
— de potassium, acide sulfurique étendu, peroxyde de plomb.	98	

Un point important pour la théorie de la pile, que M. Wheatstone a pu vérifier, au moyen de sa méthode, c'est que si l'on prend trois métaux dans leur ordre électromoteur, la force électromotrice d'un couple formé de deux métaux extrêmes est équivalente à la somme des forces électromotrices des deux couples formés des métaux consécutifs. Ainsi avec :

Amalgame de potassium, sulfate de zinc, amalgame de zinc.	29	tours.
— de zinc, sulfate de cuivre, cuivre.	30	
— de potassium, sulfate de cuivre, cuivre. . . .	59	
— de potassium, sulfate de zinc, amalgame de zinc.	29	
— de zinc, chlorure de platine, platine.	40	
— de potassium, chlorure de platine, platine. . .	69	

Dans les deux exemples, la force électromotrice déduite du raisonnement s'est trouvée être exactement équivalente à celle fournie par l'expérience.

Remarquons, en passant, la grande force électromotrice du potassium ainsi que celle du sodium qui n'est guère moindre, ce qui tient à leur puissante affinité pour l'oxygène et à la facilité avec laquelle par conséquent ils décomposent l'eau [1].

Une sixième méthode, sous le nom de *méthode d'opposition*, a été proposée par M. Jules Regnault pour la détermination des forces électromotrices; elle a été également employée par M. Gaugain. Elle est basée sur ce principe démontré par l'expérience, que si deux couples composés des mêmes éléments solides et liquides sont opposés l'un à l'autre, c'est-à-dire sont disposés de manière que, lorsqu'ils forment un circuit, l'élément positif du premier soit uni à l'élément positif du second, et que leurs deux éléments négatifs communiquent de même, il n'y a pas le moindre courant dans le système. Mais si les deux couples diffèrent, il y a circulation d'un courant dans le circuit, et la direction de ce courant est déterminée par celle du courant qui provient du couple dont la force électromotrice est la plus grande. M. Faraday, dans ses recherches sur l'origine chimique de l'électricité voltaïque, cite un grand nombre d'expériences qui établissent ce principe. La manière la plus naturelle de l'interpréter est d'admettre que dans le premier cas l'équilibre provient de ce que les forces électromotrices opposées sont égales; alors, en effet, la tendance à la polarisation

[1] M. Goodmann a trouvé que la manière la plus convenable d'employer le potassium dans la formation d'un couple voltaïque, consiste à le placer au fond d'un tube fermé par une membrane, et à mettre cette membrane en contact par sa partie inférieure avec la surface de l'eau acidulée qui recouvre une lame de platine horizontale. Une goutte de mercure placée sur la membrane sert à tenir constamment amalgamée la surface de potassium exposée à l'action de l'eau acidulée; et de l'huile de naphte dont le tube est rempli, le préserve dans tout le reste de sa surface de l'action oxydante de l'air. Un fil de cuivre implanté dans le morceau de potassium permet de fermer le circuit. Si l'on remplace par une solution de sulfate de cuivre celle d'acide sulfurique, le courant est plus constant, mais plus faible. Un couple ainsi construit décompose avec force l'eau acidulée placée dans un voltamètre à fils de platine; 12 rangées de séries donnant presque autant de tension que les 3520 couples à eau de Gassiot et les 100 de Grove, pourvu qu'ils soient bien isolés; un seul produit une légère divergence des feuilles d'or de l'électroscope. Suivant Henriel, l'amalgame de sodium a une force électromotrice presque aussi grande que celui de potassium.

de toutes les parties du circuit aussi bien solides que liquides s'exerçant exactement avec la même puissance, mais dans deux directions opposées, l'effet en doit être nul. C'est comme si les deux couples de la figure 309, page 627, étaient disposés de manière que le zinc du premier communiquât avec le zinc et non avec le platine du second; leur force électromotrice, au lieu de devenir double, deviendrait nulle. Dans le second cas, les forces électromotrices étant inégales, l'intensité du courant doit être proportionnelle à la différence des forces électromotrices des deux couples. Quant aux résistances que le courant doit surmonter, elles sont les mêmes, de quelque manière que les couples soient disposés, de sorte qu'on a $i = \frac{e - e'}{r + r'}$, $\frac{e}{r}$ et $\frac{e'}{r'}$ étant les intensités respectives des courants des deux couples qu'on oppose. Si l'opposition des deux couples annule le courant, c'est-à-dire rend i égal à 0, on doit en conclure nécessairement que $e' = e$.

Le même raisonnement s'applique aux couples en série qui constituent les piles. Ainsi on a $I = \frac{ne - n'e'}{R + R'}$, n étant le nombre des couples de la première pile, e la force électromotrice de chacun d'eux, et R la somme de leur résistance, n', e' et R' étant les valeurs correspondantes pour la seconde pile. Si I est nul, on a $ne = n'e'$, et si en fait $e' = 1$, c'est-à-dire si l'on prend pour unité la force électromotrice du couple le plus faible, on a, en supposant également $n = 1$, $e = n'$, c'est-à-dire que la force électromotrice du couple le plus fort est égal à n' fois la force électromotrice qu'on a prise pour unité, n' étant le nombre des couples les plus faibles qui font équilibre au couple unique le plus fort [1]. Le raisonnement que nous venons de faire est basé sur le principe que nous avons démontré par l'expérience, savoir, que la force électromotrice est proportionnelle dans un

[1] Il nous semble qu'il peut arriver souvent que n ne soit pas égal à 1, quoique plus petit que n'; alors, quand on a trouvé le nombre des couples de chaque espèce qu'il faut mettre en série, pour que leur opposition produise l'équilibre, on a $ne = n'$, d'où $e = \frac{n'}{n}$.

circuit composé de plusieurs couples, au nombre de ces couples disposés en série. Il est également exact, que les courants ne circulent pas quand les forces électromotrices sont égales, ou qu'ils circulent simultanément, mais en sens contraire, de manière à s'annuler dans leur circuit commun, comme nous l'avons supposé dans le § 1 de ce chapitre; supposition du reste que l'analyse des phénomènes nous a fait abandonner pour admettre celle que nous venons d'énoncer la première.

Avant de parler des applications que M. J. Regnault a faites de sa méthode à la détermination de la force électromotrice de quelques combinaisons voltaïques, il est important de fixer un instant notre attention sur un point qui ne nous a pas encore occupés, c'est le choix d'une unité à laquelle on puisse rapporter ou comparer les diverses forces électromotrices. Cette unité doit être une force électromotrice. M. J. Regnault prend pour cette unité la force électromotrice d'un couple thermo-électrique bismuth et cuivre, pour une différence de 0° à 100° entre les soudures. Puis faisant usage d'une série thermo-électrique composée de 60 couples semblables, en ayant soin que les soudures du rang pair et du rang impair demeurent à des températures sensiblement fixes pendant la durée des expériences, il cherche combien il faut employer de ces couples pour faire équilibre à un couple dont il veut déterminer la force électromotrice. C'est ainsi qu'il trouve que le courant d'un couple zinc dans sulfate de zinc et cadmium dans sulfate de cadmium, est équilibré par le courant thermo-électrique de 55 couples bismuth et cuivre, dont les soudures présentent les différences de 0 à 100°. Mais ce couple étant l'un de ceux dont la force électromotrice est la plus faible, il faudrait multiplier pour les autres dans une proportion énorme le nombre des couples thermo-électriques. Aussi M. J. Regnault propose-t-il de prendre pour couple auxiliaire celui de zinc-cadmium, les deux métaux plongeant dans leurs sulfates respectifs, qui est doué d'une constance remarquable; c'est à lui qu'on compare les autres, en se rappelant que sa force électromotrice est égale à 55 fois celle qui est prise pour unité.

M. Wheatstone avait également déterminé par sa méthode

le rapport qui existe entre la force électromotrice d'un couple thermo-électrique, bismuth et cuivre, dont les soudures étaient respectivement aux températures de 0° 100° et celle du couple, amalgame de zinc, sulfate de cuivre et cuivre; et il avait trouvé que tandis qu'il fallait pour ramener la déviation de l'aiguille avec le premier de 10° à 5° [1], seulement 8 tours de rhéostat, il en fallait 757 avec le second; ce qui établit entre les deux forces électromotrices le rapport de 1 à 94, 6. M. Pouillet, par une méthode toute différente dont nous parlerons dans l'instant, avait trouvé le rapport de 1 à 94. M. J. Regnault a trouvé un rapport bien différent, savoir, celui de 1 à 153; ce qu'il attribue à ce que, dans le couple de M. Wheatstone, une différence dans la nature du diaphragme poreux, qu'il est difficile d'avoir identique, peut modifier considérablement la force électromotrice, ainsi que le lui a démontré la comparaison expérimentale qu'il a faite entre un couple Daniell dont le diaphragme était de porcelaine dégourdie et un couple Wheatstone à diaphragmes de natures diverses [2]. Du reste, cette influence de la nature du diaphragme poreux sur la force électromotrice n'est plus sensible dans les piles à deux liquides, ainsi que l'a encore constaté M. J. Regnault, avec deux couples différents, l'un zinc-cadmium avec sulfate de zinc et sulfate de cadmium; l'autre de Daniell zinc-cuivre avec sulfate de zinc et sulfate de cuivre; il a toujours trouvé que la force électromotrice du premier était égale à 55 fois celle du couple thermo-électrique, prise pour unité, et celle du second à 175 fois cette unité, quel que fût le diaphragme employé dans deux

[1] Le courant thermo-électrique était trop faible pour faire dévier l'aiguille du galvanomètre de 45° à 40° comme dans les expériences précédentes; il a fallu, dans la comparaison de ce courant avec celui du couple hydro-électrique, avoir recours à la déviation de 10° à 5° seulement.

[2] La différence des deux forces électromotrices était déduite de l'opposition des deux couples; elle s'est trouvée de 3 unités en faveur du couple Daniell, quand les deux couples avaient l'un et l'autre un diaphragme de porcelaine dégourdie, mais elle a été successivement de 26, de 44 et de 103 en faveur du couple Wheatstone, quand les diaphragmes de ce dernier ont été de terre de pipe, de baudruche et de hêtre.

des couples, porcelaine dégourdie, terre de pipe, baudruche et différentes espèces de bois.

Quant à l'unité choisie par M. J. Regnault, qui est la même que M. Pouillet avait également adoptée, elle me paraît présenter deux inconvénients : le premier de ne pas pouvoir être toujours retrouvée exactement la même [1]; l'autre d'être prise dans une force électromotrice d'une espèce trop différente quant à son intensité et à son origine, de celle des couples hydro-électriques. Il nous semble qu'il serait préférable d'adopter pour ces derniers une unité prise parmi les forces électromotrices des couples hydro-électriques, en choisissant l'un de ceux qui donnent le courant le plus constant. Au reste, M. J. Regnault l'a bien senti, car c'est finalement à la force électromotrice du couple zinc-cadmium, sulfate de zinc et sulfate de cadmium, qu'il a comparé celle de divers couples hydro-électriques.

M. J. Regnault a confirmé, pour le potassium et pour le zinc, en se servant de sa méthode, le fait signalé par M. Wheatstone, que la proportion du métal positif contenu dans l'amalgame liquide ne paraît point affecter la force électromotrice d'un couple voltaïque dont il fait partie. Ainsi il a trouvé la force électromotrice d'un couple amalgame de zinc-cuivre chargé avec sulfate de zinc et sulfate de cuivre, égale à 178 de ces unités, qu'il y eût $\frac{1}{20}$, $\frac{1}{100}$ ou $\frac{1}{400}$ de zinc dissous dans le mercure. De même il a trouvé cette force égale à 416, qu'il y eût $\frac{1}{150}$ ou $\frac{1}{1200}$ de potassium dissous dans le mercure, avec un couple amalgame liquide de potassium et platine, chargé avec chlorure de sodium et chlorure de platine. Le résultat est, entre certaines limites, le même en ce qui concerne le degré de la dissolution dans laquelle plonge le métal positif. M. Regnault a trouvé que ce degré peut varier depuis 1 jusqu'à $\frac{11}{100}$, sans que la force électromotrice de la combinaison voltaïque en soit sensiblement troublée. Il ne faut pas perdre

[1] M. J. Regnault a reconnu cet inconvénient ; aussi s'est-il occupé de rechercher les moyens de donner aux courants produits par un plus ou un moins grand nombre de couples thermo-électriques consécutifs, toute la constance possible ; mais nous ne sommes pas convaincu qu'il y ait réussi.

de vue, dans ce cas comme dans celui de l'amalgame de zinc, qu'il ne s'agit pas ici de la quantité d'électricité produite dans un temps donné, mais de la faculté de cette électricité de surmonter une certaine résistance.

M. J. Regnauld, qui, comme M. Wheatstone, a appliqué sa méthode à la détermination des forces électromotrices de quelques combinaisons voltaïques, a trouvé en général dans le petit nombre de cas qu'il a étudiés, que la force électromotrice ne change pas très-sensiblement dans un couple de deux métaux qui plongent chacun dans une dissolution saline, avec la nature de cette dissolution, pourvu qu'elle ait pour base le métal même qui y est immergé. Cependant il y a bien des exceptions à cette loi, qui ne semble être passablement exacte que lorsque les métaux qui forment le couple sont très-éloignés l'un de l'autre dans la série électromotrice, tels que zinc et cuivre ou zinc et platine.

Nous avons vu plus haut que M. Poggendorff avait proposé une méthode en vue du cas des couples à force non constante, afin de pouvoir se mettre à l'abri de l'influence de la polarisation du métal négatif, qui occasionne une altération si prompte dans la force électromotrice de ces couples. Mais un grand nombre de physiciens ont cherché à apprécier directement cette influence en déterminant la force électromotrice des couples formés par des métaux polarisés, c'est-à-dire par des métaux dont la surface est recouverte de ces dépôts minces qui leur impriment la polarité secondaire.

Wheatstone, dans son travail sur les forces électromotrices, avait fait une remarque importante à ce sujet, savoir que la force électromotrice, contraire à celle d'un circuit voltaïque, qui naît de l'interposition dans ce circuit d'un voltamètre à électrodes de platine, chargé avec une dissolution d'acide sulfurique, est constante, c'est-à-dire est la même, quelle que soit la force du courant. Pour obtenir ce résultat, Wheatstone a placé le même voltamètre successivement dans quatre circuits composés de 3, de 4, de 5 et de 6 de ses couples, et il a déterminé dans chacun la force électromotrice *sans* et *avec* le voltamètre; puis, retranchant le nombre de tours qui exprimait la seconde

de celui qui exprimait la première, il a obtenu une différence toujours la même, qui était l'expression de la force électromotrice contraire exercée par les électrodes du voltamètre. Voici le tableau des expériences :

	Sans voltamètre.	Avec voltamètre.	Différence ou force électromotrice du voltamètre.
3 couples.	90	21	69
4 couples.	120	50	70
5 couples.	150	79	71
6 couples.	180	109	71
		Moyenne. .	70

Ainsi, la force électromotrice due à la polarisation des électrodes de platine du voltamètre peut être regardée sensiblement comme constante et égale à 70, ce qui fait qu'elle est à celle d'un seul couple comme 70 est à 30, ou comme 7 est à 3, et ce qui établit entre ces deux forces le rapport de 2,33 à 1. Voilà pourquoi il faut au moins 3 couples, constituant une combinaison voltaïque d'une force électromotrice de 90, pour décomposer l'eau avec le voltamètre.

M. Svanberg, après avoir trouvé, avec une pile de Daniell, à peu près le même rapport, savoir, celui de 2,20, au lieu de 2,33, entre la force électromotrice des électrodes polarisés P et celle d'un couple E, s'est assuré qu'il n'y a de polarisation que sur la surface sur laquelle le gaz se dégage. Il opérait comme Wheatstone avec un rhéostat. Il a d'abord placé dans le circuit de trois couples de Daniell, à la place du voltamètre, un couple cuivre-platine, le cuivre plongeant dans une dissolution de sulfate de cuivre, et le platine dans une dissolution d'acide sulfurique, le dernier servant d'électrode positif. En supposant que lui seul soit polarisé, et en appelant p cette force de polarisation, et e la force électromotrice du couple même cuivre-platine qui agit en sens contraire de celle de la pile, E étant celle d'un des couples de Daniell, on a :

$$3\,E - e - p = 18{,}01$$

Si l'on introduit maintenant dans le circuit de quatre couples

de Daniell le couple cuivre-platine, de façon que le cuivre soit l'électrode positif, et le platine le négatif recevant l'hydrogène, on trouve par expérience, en remarquant qu'ici la force électromotrice du couple cuivre-platine doit être ajoutée, au lieu d'être retranchée, et en appelant p' la force de polarisation du platine négatif :

$$4\,E + e - p' = 50{,}03$$

Mais $3\,E = 42{,}79$ par expérience, d'où $E = 14{,}26$, et par conséquent $4\,E = 57{,}05$; ce qui donne :

$$\begin{array}{rl} p + e = & 24{,}78 \\ p' - e = & 7{,}02 \\ \hline \text{d'où } p + p' = & 31{,}80 \end{array}$$

$$\text{Et } \frac{p + p}{E} = 2{,}16$$

Mais on avait trouvé $\frac{P}{E} = 2{,}20$; donc on a $p + p' = P$

Le résultat nous montre donc qu'il n'y a de polarisation que sur l'électrode où se dégage le gaz, que par conséquent dans le premier cas il n'y en a pas sur le cuivre qui, servant d'électrode négatif dans le sulfate de cuivre, se recouvre simplement de cuivre revivifié, et qu'il n'y en a pas non plus dans le second cas où le cuivre servant d'électrode positif dans l'acide sulfurique étendu, s'oxyde et se dissout. La lame de platine est donc la seule polarisée dans les deux cas; dans le premier, par l'oxygène qui lui donne une force de polarisation $p = 20{,}03$, et dans le second, par l'hydrogène qui lui en donne une $p' = 11{,}77$ [1].

M. Svanberg a cherché à déterminer la force de polarisation de l'hydrogène, quand il se dégage sur le cuivre, mais il a trouvé qu'elle était très-variable avec le degré de poli de la

[1] On pourrait être surpris de voir la force polarisante de l'oxygène supérieure à celle de l'hydrogène, contrairement à ce que Grove avait trouvé avec sa pile à gaz; mais il faut remarquer qu'ici l'oxygène provient de la décomposition de l'eau, et qu'il est ozoné.

surface du métal. Ainsi elle n'était que 1,96 quand la surface du cuivre était granuleuse, et de 12 quand cette surface était parfaitement polie, c'est-à-dire égale à la force polarisante de l'hydrogène sur une surface polie de platine.

MM. Lenz et Saweljev, dans un travail considérable sur la force électromotrice développée par la polarisation des lames des électrodes, ont généralisé le résultat de Svanberg, et ils sont parvenus aux lois suivantes : 1° la polarisation des lames qui servent d'électrodes n'a lieu qu'autant qu'il se dégage des gaz sur leur surface; 2° la polarisation qui résulte de la décomposition d'un liquide entre deux électrodes est la somme de la polarisation produite sur chaque électrode; 3° la polarisation et les forces électromotrices dans chaque auge du circuit où il y a décomposition, se somment, algébriquement parlant, c'est-à-dire chacune avec son signe dépendant du sens dans lequel elle agit; 4° on peut ordonner toutes les diverses combinaisons d'un métal avec un liquide, sous le rapport de leurs forces électromotrices, en une série dans laquelle chacune soit positive par rapport à celle qui la précède, et les forces électromotrices résultantes pouvant être exprimées par des nombres tels que ceux qui résulteraient de la réunion de deux combinaisons quelconques, sont représentées par la différence des deux nombres correspondants; 5° à la démonstration expérimentale de ces quatre lois sont joints deux tableaux dont l'un donne les valeurs des polarités secondaires de quelques métaux dans l'oxygène et l'hydrogène, et l'autre celui des forces électromotrices de différents métaux dans leur contact avec divers liquides, en éliminant l'élément contraire de la polarisation. Dans ces deux tableaux l'unité est tout à fait arbitraire, puisqu'elle dépend de l'instrument particulier qui a servi aux déterminations; mais comme il ne s'agit que de rapports, c'est sans inconvénient [1].

[1] L'unité du courant était celle qui déviait de 1° l'aiguille du galvanomètre; l'unité de résistance, celle de 1 tour de rhéostat; l'unité de force électromotrice, celle qui produisait avec la résistance 1, le courant 1.

PREMIER TABLEAU.

	Polarisation.	En unités du rhéostat.
Platine dans l'oxygène.	2,49	48,8
Platine dans le chlore.	0,00	00,0
Graphite dans l'oxygène.	1,33	26,0
Or dans l'oxygène.	2,71	51,1
Platine dans l'hydrogène.	3,67	71,9
Zinc dans l'hydrogène.	0,90	17,6
Cuivre dans l'hydrogène.	2,30	45,0
Étain dans l'hydrogène.	1,55	30,4
Fer dans l'hydrogène.	0,48	9,4
Mercure dans l'hydrogène.	4,37	85,6
Cuivre dans l'oxygène.	0,69	13,5

DEUXIÈME TABLEAU.

	Forces électro-motrices.	En unités du rhéostat.
Platine dans l'acide chlorhydrique.	0,26	5,1
Platine dans l'acide sulfurique.	0,02	0,4
Platine dans l'acide acétique.	0,00	0,0
Graphite dans l'acide azotique.	0,01	0,2
Or dans l'acide azotique.	0,06	1,2
Or dans l'acide sulfurique.	0,25	4,9
Mercure dans l'acide sulfurique.	0,70	13,7
Mercure dans l'acétate de protoxyde de cuivre.	0,79	15,5
Platine dans une dissolution de potasse. . .	1,20	23,5
Cuivre pur dans l'acide sulfurique.	1,39	27,2
Cuivre un peu oxydé dans l'acide sulfurique.	1,75	34,3
Cuivre dans le sulfate de cuivre.	2,00	39,2
Or dans une dissolution de potasse.	2,31	45,2
Étain dans l'acide chlorhydrique.	2,38	46,4
Fer dans l'acide chlorhydrique.	2,75	53,9
Graphite dans la potasse.	2,84	55,
Fer dans l'acide sulfurique.	2,92	57,2
Étain dans l'acide sulfurique.	2,95	57,8
Cuivre dans une dissolution de potasse. . .	8,10	60,7
Étain dans une dissolution de potasse. . . .	3,94	77,2
Zinc dans l'acide azotique étendu.	4,01	79,2
Zinc dans l'acide chlorhydrique étendu. . .	4,07	79,9
Zinc dans l'acide sulfurique.	4,17	81,9
Fer dans une dissolution de potasse. . . .	4,65	91,1
Zinc dans une dissolution de potasse. . . .	5,48	107,4

La méthode employée par MM. Lenz et Saweljev consistait à avoir deux liquides séparés par un diaphragme poreux, dans chacun desquels plongeait une lame métallique servant d'électrode; un multiplicateur et un rhéostat, soit agomètre, comme l'appellent ces physiciens, étant avec la cellule à décomposition introduite dans le circuit d'une pile de Daniell. On amenait, au moyen du rhéostat, l'aiguille du galvanomètre d'abord à un certain degré de déviation, ensuite à un autre; puis on faisait la même opération, en ôtant simplement du circuit la cellule à décomposition; le tout répété plusieurs fois pour avoir des moyennes exactes; et de la comparaison des résultats on déduisait la force électromotrice contraire exercée par la cellule à décomposition, et par conséquent la polarisation de ses lames. C'est ainsi, comme nous allons le voir, qu'ont été dressés les tableaux ci-dessus.

Admettant que la polarisation est uniquement produite par le dégagement du gaz, pour déterminer la polarisation de chaque électrode en particulier, dans le cas de la décomposition de l'eau par des électrodes de platine, on commence par la déterminer dans le cas où les deux lames de platine plongent dans de l'acide nitrique, parce qu'il n'y a alors aucun dégagement d'hydrogène à l'électrode négatif; on a la valeur de la polarisation due à l'oxygène qu'on trouve égale à 2,48, puis faisant la même opération en plongeant les lames de platine dans l'acide sulfurique étendu, on a une polarisation égale à 5,46 qui est la somme des polarisations dues respectivement à l'oxygène et à l'hydrogène, puisqu'il y a dégagement de gaz sur les deux électrodes. Pour avoir la dernière, celle due à l'hydrogène, il n'y a qu'à retrancher 2,65 de 5,46; ce qui donne 3 pour sa valeur. Mais cette valeur change avec les métaux sur lesquels se dépose l'hydrogène. Ainsi, avec le zinc amalgamé elle est seulement 1,00, avec le cuivre 2,15, avec l'étain 1,45, avec le fer 0,33, etc. Ces nombres diffèrent un peu de ceux du tableau qui sont plus exacts, vu qu'ils ont été obtenus à la suite d'expériences plus nombreuses et plus variées.

Quant au tableau des forces électromotrices des métaux dans divers liquides sans qu'il y ait polarisation, il a été également

dressé soit au moyen d'observations directes, soit en retranchant des observations où la polarisation intervenait, l'effet dû à cette polarisation, qui avait été déterminé directement.

M. Beetz, qui s'est aussi occupé de la force électromotrice des gaz, a fait usage d'une méthode toute différente et beaucoup plus directe que celle de MM. Lenz et Saweljev; il a tout simplement appliqué le procédé de compensation de Poggendorff à la pile à gaz de Grove, en la chargeant successivement avec diverses substances gazeuses, et en faisant usage d'un couple zinc platine de Grove pour établir la compensation. Il a pris beaucoup de précaution dans la préparation des platines de la pile à gaz et de cette pile en général, dans laquelle il avait soin de n'introduire que des gaz bien purs, après avoir chassé tout l'air de la dissolution d'acide sulfurique dont étaient pleins les tubes qui devaient recevoir les substances gazeuses. Voici le tableau des forces électromotrices développées en associant avec l'hydrogène qui était toujours dans l'un des tubes, les diverses substances dont les noms suivent et parmi lesquelles M. Beetz en a introduit deux solides, savoir le platine sans gaz en contact immédiat avec le liquide et du platine recouvert de cuivre ; il est assez remarquable que l'ordre dans lequel sont rangées les diverses substances, quant à leur force électromotrice, soit exactement le même que celui que Grove avait trouvé.

Noms des substances.	Forces électromotrices.
Chlore.	31,49
Brome.	27,97
Oxygène.	23,98
Oxyde d'azote.	21,33
Cyanogène.	21,16
Acide carbonique.	20,97
Oxyde d'azote.	20,52
Fer.	20,50
Platine.	20,13
Sulfure de carbone.	19,60
Gaz oléfiant.	18,36
Phosphore.	16,06
Oxyde de carbone.	13,02
Cuivre.	3,82
Hydrogène sulfuré.	3,05
Hydrogène.	0,00

Les expériences de Beetz ont montré que, conformément à l'opinion de M. Grove, l'oxygène contribue d'une manière directe au développement du courant dans la pile oxygène-hydrogène, puisque lorsque l'hydrogène est associé à l'oxygène, la force électromotrice est de 23,98, tandis qu'elle n'est plus que de 20,13 lorsqu'il est réuni au platine; ce qui donne 3,85 pour la force électromotrice du platine recouvert d'oxygène. Ce n'est point un effet dû à l'action dépolarisante de l'oxygène, puisque le circuit ne reste fermé qu'un instant. C'est à la première cause qu'il faut attribuer le fait également observé par M. Beetz, et signalé déjà, comme nous l'avons vu, par M. Poggendorff, que les lames de platine, pourvu qu'elles soient bien nettoyées, donnent autant d'effet que lorsqu'elles sont platinées, ce qui tient à ce qu'elles n'ont pas le temps de se polariser; or c'est leur faculté de se polariser beaucoup plus fortement que les lames platinées, qui leur donne une grande infériorité quand le circuit reste longtemps fermé.

L'influence qu'exerce en général sur les phénomènes de cet ordre la nature de la substance solide sur la surface de laquelle se trouve la couche gazeuse, provient de ce que jamais cette surface n'est entièrement recouverte par le gaz, et qu'il y a toujours quelques points de contact entre elle et le liquide. Si les lames immergées pouvaient être entièrement isolées du liquide par les gaz dont elles sont enveloppées, la nature chimique des masses métalliques serait tout à fait indifférente. Quand les lames sont recouvertes de gaz au moyen de la décomposition électrolytique, elles le sont d'une manière beaucoup plus complète que par tout autre moyen; mais elles ne le sont jamais assez complétement, même quand on leur a donné le maximum de polarisation, pour que la nature du métal ne joue aucun rôle. Toutefois le pouvoir électromoteur développé par ce moyen au lieu d'être de 24, comme M. Beetz l'a trouvé au moyen d'oxygène et d'hydrogène introduits dans les tubes, est, suivant M. Poggendorff, de 55 quand les lames de platine ont leur éclat métallique et de 40 quand elles sont platinées. Tout en reconnaissant que l'oxygène et l'hydrogène qui arrivent sur la surface du platine par voie électrolytique, y forment

des dépôts beaucoup plus continus, nous croyons que cette énorme différence tient surtout à ce que l'oxygène, lorsqu'il est produit de cette manière, est ozoné, circonstance qui augmente considérablement sa force électromotrice, ainsi que nous l'avons vu.

Il est un point sur lequel M. Beetz ne s'accorde pas avec MM. Lenz et Saweljev, c'est ce qui concerne la force électromotrice du chlore, que ces physiciens avaient trouvé être nulle, ce qui tient probablement à ce que le platine, dans leurs expériences, était attaqué par le chlore et formait un chlorure qui se dissolvait. M. Beetz, dans de nombreuses et laborieuses recherches que nous regrettons de ne pouvoir rapporter ici un peu plus en détail, a constamment trouvé, soit en opérant directement sur du chlore gazeux, soit en déposant le chlore sur le platine par la décomposition électrolytique des chlorures ou de l'acide hydrochlorique, les nombres bien rapprochés, 10,27 et 11,0, pour la force de polarisation du *platine-chlore;* il a également trouvé pour celle du *platine-hydrogène* 19,08, qui, ajoutée à la première, fait environ 30, nombre un peu inférieur seulement à celui que fournit l'observation directe faite avec la pile à gaz hydrogène et chlore. En décomposant des iodures et des bromures, M. Beetz a pu déterminer également la force électromotrice de l'iode et du brome qu'il a trouvée être, la première de 3,36, la seconde de 6,96, celle du chlore étant 10,10.

Il résulte évidemment de l'analyse que nous venons de faire des travaux relatifs à la force électromotrice des gaz, que les détermiuations numériques laissent encore quelque incertitude, vu l'influence qu'exercent sur la force du courant la nature de la substance solide qui établit le contact entre le gaz et le liquide, et la manière dont le dépôt a été opéré.

Un point sur lequel les physiciens ne sont pas d'accord, c'est le rapport qui existe entre les polarités secondaires acquises par des lames qui ont servi d'électrodes à un courant dans un liquide électrolytique, et l'intensité de ce courant. Nous avons vu que, d'après Wheatstone, l'énergie des polarités secondaires serait constante et indépendante de l'intensité du courant.

M. Poggendorff est arrivé à un résultat différent, et il a trouvé que cette énergie croît avec l'intensité du courant, et d'une manière d'autant plus sensible que celui-ci a une force absolue moindre. Il opère avec une pile de deux couples de Grove dont il détermine la puissance électromotrice d'abord quand elle est seule, ensuite quand on y a introduit un voltamètre, soit un couple inactif de deux lames de platine plongées dans l'acide sulfurique étendu. Puis faisant varier la longueur du fil d'un rhéostat placé dans le circuit, il voit quelles sont les variations correspondantes qu'éprouve la force électromotrice du nouveau circuit, qui est égale à la différence entre la force électromotrice primitive des deux couples de Grove et celle contraire qui résulte des polarités secondaires acquises par les deux lames de platine. Or, si cette dernière est constante, la première l'étant évidemment, leur différence devra l'être aussi, ce qui n'est pas, ainsi que le prouve le tableau suivant dans lequel l exprime la longueur du fil du rhéostat, i l'intensité du courant mesuré par le galvanomètre à sinus, E' la force électromotrice du circuit, et p la force électromotrice provenant des polarités secondaires acquises par les lames. On obtient p en retranchant E' de E force électromotrice du circuit avant l'introduction du couple inactif de platine, qu'on a trouvée égale à 46,85 en commençant les expériences, et à 46,53 en finissant, ce qui prouve la constance de la pile. Quant à la résistance totale du circuit, y compris le fil du galvanomètre à sinus, elle était de 8,78 avant l'introduction du couple inactif, et de 12,79 une fois le couple introduit.

l	i	E'[1]	p
6	80,15	18,51	28,18
8	62,58		
10	54,17	18,50	28,19
20	34,56	18,77	27,92
40	21,17	19,16	27,53
80	12,14	19,66	27,03

[1] La première valeur de E' a été déduite des deux intensités 80,15 et 62,58, au moyen de la méthode de Ohm, ce qui était permis, vu le petit intervalle de temps qui s'était écoulé entre les deux expériences consécutives.

l	i	E'	p
160	6,42	20,16	26,53
340,87	3,27	21,28	25,41
80	12,80	19,50	27,19
40	21,11	19,08	27,61
20	34,12	18,43	28,26
10	53,39	18,36	28,33
8	61,27	18,26	28,43
6	76,41	18,28	28,41

Remarquons cependant que les différences observées par M. Poggendorff, entre les valeurs diverses de p, ne sont pas bien grandes, et peuvent tenir à l'inconstance que présente toujours plus ou moins la polarité secondaire de l'électrode positif, à cause de la présence à cet électrode d'une proportion plus ou moins grande d'oxygène ozoné.

M. Poggendorff a appliqué la détermination des polarités secondaires à l'évaluation de la résistance totale qu'exerce sur un courant, le courant produit par un couple plus faible placé dans le circuit du plus fort, mais en sens contraire. Il a ainsi trouvé qu'un simple couple zinc-platine ou zinc-cuivre, dans une dissolution d'acide sulfurique, interposé de cette manière dans le circuit d'une pile de trois couples de Grove, de façon que l'hydrogène se déposât sur le zinc et l'oxygène sur le platine ou le cuivre, exerçait une force de résistance qui était exactement la somme de sa force électromotrice propre et de celle provenant des polarités secondaires des deux lames.

Ce principe permet ainsi d'évaluer les forces électromotrices des couples à force non constante, une fois qu'on connaît les forces électromotrices développées par les polarités secondaires, qu'il faut, dans ce cas, retrancher de celles que l'expérience fournit, pour avoir la force électromotrice des couples eux-mêmes, avant que leurs lames aient été polarisées. C'est par ce moyen que MM. Lenz et Saweljev avaient dressé le second tableau que nous avons rapporté plus haut, et qui contient les forces électromotrices des métaux plongés dans divers liquides. M. Poggendorff remarque du reste avec raison, que pour la détermination des forces électromotrices des couples à

force non constante, sa méthode de compensation a l'avantage d'être bien plus directe et plus exacte.

Cette méthode de Poggendorff, que nous n'avons fait que signaler et que nous avons développée dans la note F, a permis à son auteur d'éclaircir bien des points encore obscurs relatifs à l'influence de certaines causes sur la force électromotrice. Ainsi on avait observé que, quand la résistance n'est pas très-grande, le courant d'un couple zinc et fer plongeant dans un acide étendu l'emporte sur celui d'un couple zinc et cuivre placé dans les mêmes circonstances, quoique le fer soit plus positif que le cuivre, et puisse former avec lui un couple où il est le métal positif. Ce résultat tient évidemment à l'effet de la polarité secondaire, qui est plus considérable sur le cuivre que sur le fer. Pour le prouver, il suffit d'employer la méthode des compensations de Poggendorff, qui ne permet pas au courant de s'établir, et qui fait qu'on évite ainsi les polarités secondaires; on se sert, pour obtenir la compensation, d'un couple de Grove dont la force électromotrice est de 22,882 et la résistance propre de 5,47 unités de longueur d'un fil d'argentane, et on obtient les nombres suivants pour les forces électromotrices E des couples dont la résistance r a été déterminée dans chaque cas, et qui plongeaient dans un mélange de 1 partie d'acide sulfurique et 16 parties d'eau[1].

Couples.	r	E
Zinc amalgamé, cuivre. . . .	52,68	13,792
Zinc amalgamé, fer.	16,59	7,399
Fer, cuivre.	12,34	6,000

Ainsi on voit que toutes les fois qu'on ne permet pas au courant d'entrer en activité, ce qui est le cas dans la méthode de compensation, la force électromotrice du couple zinc-cuivre est plus grande que celle du couple zinc-fer. On retrouve également pour les couples à force non constante, la loi déjà signalée par M. Wheatstone, savoir que si on a deux couples, la

[1] L'unité à laquelle E est rapporté est tout à fait arbitraire; elle dépend du couple qui sert à établir la compensation, mais sa valeur absolue n'a aucune importance pour l'objet que nous avons en vue.

force électromotrice d'un troisième formé des deux métaux extrêmes des deux premiers, est équivalente à la somme des forces électromotrices des deux couples formés des métaux consécutifs[1]. En effet, en ajoutant 7,399 et 6,000 dans le tableau ci-dessus, on trouve 13,399, nombre bien rapproché de 13,792.

Après cet examen détaillé des différentes méthodes employées, accompagné de quelques-uns des résultats obtenus, nous devrions indiquer les forces électromotrices des diverses combinaisons voltaïques ; mais parmi les déterminations qu'on a faites, nous nous bornerons à citer celles qui nous paraissent les meilleures et les plus importantes.

Poggendorff a eu l'idée de remplacer dans les piles de Grove et de Bunzen l'acide nitrique par l'acide chromique qui renferme aussi beaucoup d'oxygène et qui l'abandonne facilement. La dissolution dont il a fait usage se compose d'un mélange de 3 parties en poids de chromate acide de potasse, 4 d'acide sulfurique concentré et 18 d'eau. Il a plongé successivement dans ce liquide un charbon de Bunzen, du platine et du cuivre, l'autre élément du couple étant du zinc amalgamé mis dans un mélange de 9 parties en poids d'eau et de 1 d'acide sulfurique concentré ; un vase d'argile poreuse séparait les deux liquides. Voici le résultat de trois expériences comparatives.

		Resistance du couple.	Force électromotrice.
Couple Bunzen.	Acide nitrique. . .	6,30	21,06
	Acide chromique. .	12,28	21,61
Couple Grove.	Acide nitrique. . .	5,04	21,29
	Acide chromique. .	8,30	13,42
Couple Daniell.	Sulfate de cuivre. .	14,72	13,63
	Acide chromique. .	6,34	13,20

On voit qu'avec le platine la force dans le couple où est l'acide chromique n'est guère que les deux tiers de ce qu'elle est avec l'acide nitrique même peu concentré, car l'acide nitrique dont on faisait usage était de 1,30 de densité. Avec le charbon la

[1] Tome II, page 731.

force électromotrice est la même avec les deux acides, mais outre qu'elle n'est pas très-constante avec l'acide chromique, la résistance du couple avec cet acide est presque deux fois aussi grande qu'avec l'acide nitrique. Il n'y a donc pas d'avantage à remplacer l'acide nitrique par l'acide chromique, quoiqu'on évite ainsi les vapeurs nitreuses.

Voici, du reste, quelques déterminations de forces électromotrices faites avec soin pour les couples les plus usuels; nous ne donnons pour chacun que les moyennes de plusieurs expériences. Les forces électromotrices ont été calculées au moyen des formules $i = \frac{E}{R}$ et $i' = \frac{E}{R+l}$, qui donnent $E = i i' \frac{l}{i - i'}$, i et i' étant déterminés par le galvanomètre à tangente qui était mis dans le circuit; la longueur l du fil additionnel a varié de 0 à 69 mètres.

	E
Couple de Grove.	829
Couple de Bunzen (Delœuil).	839
Couple de Bunzen (Stohrer).	777
Couple de Daniell	470
Couple de Smee.	210
Couple de Wollaston.	208

On a également déterminé R pour chaque couple en éliminant E, mais cet élément était très-variable. Cependant il est à remarquer qu'il est beaucoup moindre pour les piles à un seul liquide où il n'y a pas de diaphragme poreux.

Voici encore une détermination faite par M. Jacobi, d'après une méthode fondée sur le principe des courants dérivés et dans laquelle on ramène, comme dans la méthode de Wheatstone, l'aiguille au même degré de déviation dans chaque cas. Il a trouvé par quatre observations parfaitement concordantes que si la force électromotrice d'un couple Daniell est exprimée par 21,042, celle d'un couple de Grove l'est par 35,201, rapport qui n'est pas très-éloigné de celui qu'on peut tirer du tableau qui précède.

M. Joule a déterminé la force électromotrice d'un très-grand nombre de combinaisons voltaïques par le procédé de Fechner,

c'est-à-dire en introduisant dans le circuit un galvanomètre dont la résistance soit assez grande, 300 fois au moins celle de chaque couple, pour que cette dernière disparaisse vis-à-vis de la première, de sorte qu'on puisse regarder la force électromotrice comme proportionnelle à l'intensité du courant. Voici quelques-uns des résultats :

Platine.	— Acide nitrique.	— Potasse dissoute.	— Amalgame de potassium.	302
«	«	«	— Amalgame de zinc. . .	234
«	«	«	— Fer	169
«	«	«	— Cuivre.	120
«	«	«	— Argent.	66
«	«	«	— Platine.	31
«	«	— Solution de sel ordinaire. . . .	— Amalgame de zinc. . .	198
«	«	«	— Fer.	146
«	«	«	— Cuivre.	116
«	«	«	— Argent.	95
«	«	«	— Platine.	55
«	«	— Acide sulfurique étendu. . . .	— Amalgame de zinc. . .	187
«	«	«	— Fer.	140
«	«	«	— Cuivre.	91
«	«	«	— Argent.	53
«	«	«	— Platine.	37
«	— Peroxy^de de plomb avec acid. suif.	— Potasse dissoute.	— Amalgame de zinc. . .	277
«	«	«	— Fer.	177

M. Joule croit qu'on peut conclure du tableau des forces électromotrices qu'il a déterminées, et, dont nous n'avons rapporté que quelques-unes, que la différence entre les forces électromotrices de deux métaux positifs plongés dans une solution semblable est une quantité constante, quels que soient les changements qu'on fasse subir aux éléments négatifs des couples.

Comme on le voit, le nombre des combinaisons voltaïques dont on a déterminé la force électromotrice est déjà assez considérable ; malheureusement ces déterminations ne sont pas faites d'après les mêmes méthodes, ni sur le même plan ; néanmoins elles sont suffisantes au point de vue pratique, et même,

elles peuvent aussi fournir, comme nous le verrons dans notre dernier paragraphe, quelques données précieuses sur les rapports qui existent entre les forces chimiques et les forces électriques. Un point essentiel sous le rapport théorique qu'elles permettent déjà d'établir, c'est la proportionnalité parfaitement exacte qui existe entre la force électromotrice déduite de l'intensité du courant et celle conclue de l'énergie de la tension statique, quand le circuit est ouvert au lieu d'être fermé. Cette proportionnalité est une conséquence naturelle du principe que nous avons établi, en nous fondant sur l'expérience, savoir : que lorsqu'on charge le condensateur au moyen d'un couple, on a une décharge qui est un véritable courant élémentaire[1]. Dès lors la force électromotrice de cet élément de courant doit être la même que celle du courant lui-même, quelle que soit la durée de ce dernier. C'est M. Kohlrausch qui, par des expériences exactes dont nous allons donner les détails, a établi cette loi importante.

M. Kohlrausch faisait usage d'un électroscope de Dellmann muni d'un condensateur. L'électroscope de Dellmann n'est qu'une sorte de balance de torsion, dont la construction très-délicate permet la mesure des forces les plus petites. Le condensateur employé par M. Kohlrausch était disposé d'une manière particulière, afin d'écarter les diverses causes d'erreur que comporte trop souvent l'usage de cet instrument. Il était formé de deux plaques de laiton, d'environ 15 centimètres de diamètre sur trois millimètres d'épaisseur, suspendues chacune par 3 cordons de soie; les cordons qui soutenaient la plaque supérieure, longs de 25 à 30 centimètres, s'attachaient à une pièce mobile qui permettait d'éloigner ou de rapprocher à volonté les deux plaques l'une de l'autre. La plaque inférieure était recouverte d'une couche très-mince de vernis à la gomme-laque, et présentait en trois points voisins de ses bords trois petites colonnes de gomme-laque : la plaque supérieure posait sur ces colonnes lorsqu'on voulait faire l'expérience, et n'était vernie qu'aux trois points correspondants.

[1] Tome II, page 615.

Par suite de cet arrangement, la distance des plaques et la force condensante demeuraient constantes pendant toute la durée des expériences; le mode de suspension faisait disparaître les perturbations si fréquentes que produit l'électricité qui finit toujours par s'accumuler sur les supports en verre des condensateurs ordinaires. Le plateau inférieur jouait le rôle du plateau condensateur, et communiquait en général avec le sol; le plateau supérieur jouait le rôle du plateau collecteur, et pour le faire communiquer avec l'électroscope, il suffisait de le soulever jusqu'à lui faire toucher un fil F qui se rendait à l'électroscope; la hauteur de ce fil était maintenue constante pendant toute la durée des expériences.

Pour charger cet appareil, on procédait de la manière suivante :

1° On soulevait le plateau supérieur jusqu'au fil F, et, touchant le fil F avec un autre fil qui communiquait au sol, on déchargeait à la fois le condensateur et l'électroscope.

2° On supprimait la communication du plateau inférieur avec le sol.

3° On descendait le plateau supérieur sur le plateau inférieur, et, en même temps, on réglait l'électroscope.

4° Par le mouvement d'un mécanisme qu'il est inutile de décrire, on mettait les deux plateaux en rapport avec les deux pôles du couple voltaïque étudié.

5° On supprimait les communications établies entre les plateaux et les pôles du couple voltaïque, et l'on rétablissait la communication du plateau inférieur avec le sol.

6° On soulevait le plateau jusqu'au contact du fil F, et l'on mesurait la charge de l'électroscope.

Dans toute cette suite d'opérations, on avait grand soin de ne jamais toucher les pièces métalliques des appareils avec les doigts, dont l'humidité aurait pu causer une action électromotrice.

Les forces électromotrices étaient déterminées par la méthode de Wheatstone, fondée sur l'usage du galvanomètre et du rhéostat. On répétait cette mesure quatre ou cinq fois avant l'application du condensateur, et quatre ou cinq fois après. Les

différences des observations individuelles n'excédaient pas en général $\frac{1}{75}$ de la valeur moyenne. Le condensateur était lui-même appliqué deux fois à chaque pôle, et l'on prenait la moyenne des quatre tensions ainsi déterminées comme égale à la véritable tension du couple. On observait, dans chaque cas, l'impulsion initiale communiquée à l'aiguille de l'électroscope de Dellmann, et la torsion nécessaire pour maintenir cette aiguille à 36 degrés de la ligne fixe; l'impulsion initiale ou la racine carrée de la torsion pouvait également servir de mesure à la tension électrique.

Le tableau suivant contient le résultat des expériences. E y désigne la force électromotrice, T la tension mesurée par l'impulsion initiale, T′ la tension mesurée par la racine carrée de la torsion. Afin de rendre plus facile la comparaison des résultats, on a multiplié les valeurs observées de T et T′ par des facteurs tels que la force électromotrice du premier couple voltaïque inscrit dans le tableau, fût exprimée exactement par le même nombre que les deux valeurs correspondantes de T et de T′.

NATURE DU COUPLE.		T	T′
Zinc, sulfate de zinc, acide nitrique de 1,357 de densité, platine. . .	28,22	28,22	28,22
Zinc, sulfate de zinc, acide nitrique de 1,213 de densité, platine. . .	28,43	27,77	27,75
Zinc, sulfate de zinc, acide nitrique de 1,213 de densité, charbon. . .	26,29	26,15	26,19
Zinc, sulfate de zinc, sulfate de cuivre, cuivre (couple de Daniell). . .	18,81	18,88	19,06
Argent, cyanure de potassium, sel marin, sulfate de cuivre, cuivre. .	14,08	14,27	14,29
Le même couple au bout de quelque temps.	13,67	13,94	13,82
Le même couple au bout d'un temps plus long.	12,35	12,36	12,36

Il faut remarquer que l'exactitude rigoureuse avec laquelle la force électromotrice, mesurée par l'intensité du courant, est proportionnelle à celle déduite de l'énergie de la tension, tient

à ce que les couples sont des couples à deux liquides ; car autrement, la tension évaluée après la circulation du courant, ne serait plus la même que celle qu'on observe avant cette circulation, à cause de la polarité secondaire qu'aurait acquise l'élément négatif du couple.

Après nous être occupé de tout ce qui concerne la force électromotrice d'un seul couple, et avoir indiqué les moyens de comparer, sous ce rapport, les divers couples les uns aux autres, il nous reste à indiquer les lois qui lient la force électromotrice d'une réunion de plusieurs couples en série constituant une pile, avec celle des couples qui la composent. Nous avons déjà vu que Wheatstone avait établi, par une expérience, la loi très-simple que, lorsque les couples sont semblables, la force électromotrice de la pile est pour une pile de n couples ne, e étant la force électromotrice d'un couple, et la résistance nr, r étant la résistance d'un couple, tellement que $I=\frac{ne}{nr}=\frac{e}{r}=i$, I étant l'intensité du courant de la pile, et i celle d'un de ses couples. Mais ce résultat ne se vérifie, qu'autant qu'on introduit dans la pile chaque couple avec sa résistance. Ainsi, si après avoir pris l'intensité du courant d'un couple avec le galvanomètre à sinus, on prend celle du courant d'une pile de n couples en se bornant à introduire dans son circuit le même galvanomètre à sinus, on trouvera une intensité beaucoup plus grande. Pour trouver la même, il faut que chacun des couples qui, par leur réunion, composent la pile, entrent dans sa formation avec une résistance égale à celle qu'offrait leur circuit, quand le galvanomètre à sinus en faisait partie. Alors, l'intensité du courant de n couples en série est égale à celle d'un seul. En effet, on a pour un seul couple $i=\frac{e}{r+l}$, l étant la résistance du galvanomètre, et pour n couples on a : $I=\frac{ne}{nr+l}$, si on ne met que le même galvanomètre dans le circuit des n couples, tandis que si on met chaque couple en y ajoutant la résistance l, on a : $I=\frac{ne}{nr+nl}=i$.

Ce principe important, que chaque couple entre dans la formation d'une pile avec sa force électromotrice et sa résistance, les autres couples ne devant être considérés, par rapport à lui, que comme de simples conducteurs, a été démontré expérimentalement par Fechner et par Pouillet. M. Pouillet, comme nous l'avons déjà vu, avait d'abord exprimé la résistance d'un couple par la longueur d'un fil de cuivre, présentant une résistance équivalente, et qu'il appelait *longueur réduite*; il avait trouvé ensuite, en allongeant ce fil, que, conformément aux lois qui régissent l'intensité d'un courant, cette intensité mesurée par le galvanomètre à tangente, était en raison inverse de la longueur du circuit. Puis, après avoir déterminé l'intensité individuelle, c'est-à-dire la force électromotrice, et la résistance propre d'un certain nombre de couples, il les avait réunis en série, et ayant mesuré l'intensité du courant produit par cette pile, il avait trouvé le résultat de l'expérience parfaitement d'accord avec celui du calcul.

Ainsi généralement, on peut exprimer l'intensité du courant d'une pile composée de couples différents par la formule :

$$I = \frac{e + e' + e'' + e''' \ldots}{r + r' + r'' + r''' \ldots}$$

Puisque pour le couple dont la force électromotrice est e, l'intensité de son courant, une fois qu'il fait partie de la pile, est $i = \frac{e}{r + r' + r'' + r'''}$; pour le couple e', l'intensité est $i' = \frac{e'}{r + r' + r'' + r'''}$, et ainsi de suite pour les autres.

Poggendorff a vérifié l'exactitude de cette loi pour le cas de deux couples, l'un de Grove, l'autre de Daniell, réunis en série, dont il avait déterminé la force électromotrice et la résistance individuelle.

		Force électromotrice.	Résistance.
Couple de Grove.		25,79	5,08
Couple de Daniell.		15,87	13,73
Pile formée par les deux couples en série.	Calcul.	41,66	18,81
	Expérience.	41,62	18,91

Dans le cas où deux ou plusieurs couples étant en série, l'un d'eux est disposé de façon que son courant doive cheminer en sens contraire de celui des autres, il faut affecter sa force électromotrice du signe —, dans l'expression générale de l'intensité; mais il n'y a rien à changer au dénominateur, les résistances n'éprouvant, par cette inversion, aucune modification. Toutefois, ce résultat théorique ne se vérifie exactement par l'expérience que dans le cas particulier où l'intensité du courant est égale à 0, parce qu'il y a égalité entre les forces électromotrices qui agissent dans un sens, et celles qui agissent en sens contraire. Dans les autres cas, par exemple, quand on oppose un couple de Grove à un couple de Daniell, le courant le plus fort, celui du couple de Grove, agit sur le couple du plus faible, celui de Daniell, et le modifie en oxydant son cuivre et en opérant une réduction sur son zinc, de manière à diminuer sa force électromotrice. Le courant définitif, qui résulte de la différence des deux autres, se trouve ainsi être plus fort que ne l'indique la théorie, et il y va en augmentant à mesure que l'expérience dure, quand même les couples séparés donnaient auparavant un courant à force constante [1].

Ce n'est donc que dans le cas où les deux forces électromotrices opposées sont égales, que l'intensité du courant est, conformément à la théorie, complétement nulle, quelles que soient, du reste, les résistances. Ainsi, si l'on oppose l'un à l'autre deux couples semblables, Grove, Daniell, Smee, n'importe leur nature, dans l'un desquels les métaux aient une très-grande surface, tandis que l'autre en a une très-petite, on a un courant nul, quoique chacun de ces couples puisse séparé-

[1] Il résulte bien évidemment de là que quand deux couples sont opposés l'un à l'autre, il n'y a pas transmission dans le circuit de deux courants contraires, mais bien d'un seul qui est produit par la différence entre la force avec laquelle l'un des couples polarise les différentes parties successives du circuit, et celle avec laquelle l'autre couple exerce la même polarisation. Si ces deux forces sont égales, les différentes parties du circuit ne sont pas polarisées, et il n'y a pas de courant du tout. Si les choses se passaient autrement, le courant du couple le plus faible, en traversant le plus fort, devrait l'affaiblir comme lui-même est affaibli par le courant du plus fort.

ment produire des effets très-différents. En effet, si nous appelons r la résistance de celui à grande surface, celle du couple à petite surface bien plus grande d'après la loi des sections sera R; mais les forces électromotrices, qui ne dépendent que de la nature des éléments solides et liquides lesquels sont les mêmes dans les deux couples, sont également e pour l'un et pour l'autre, de sorte que, lors même qu'on aura pour le premier $i = \frac{e}{r}$ bien plus grand que $i' = \frac{e}{R}$ du second, on aura pourtant $I = \frac{e - e}{r + R} = o$ quand on les réunira en les opposant l'un à l'autre.

Il résulte de là que, si dans une pile composée d'un certain nombre de couples en série parfaitement semblables les uns aux autres, on augmente les dimensions de l'un ou de plusieurs d'entre eux, sans rien changer à leur nature, on ne modifie en rien la force électromotrice de la pile qui est toujours la somme des forces électromotrices individuelles de chaque couple; mais on augmente la force du courant ou la quantité d'électricité qui passe dans un temps donné, parce qu'on diminue la résistance totale du circuit en diminuant celles des couples dont on a augmenté les dimensions. C'est ce qu'on peut vérifier avec la pile de la fig. 310 [1], dans laquelle on recueille l'hydrogène qui se dégage à l'élément négatif de chacun de ses couples. Lorsqu'on augmente la surface de l'un des couples, on a plus d'hydrogène dégagé aux platines, mais toujours la même quantité sur chacun d'eux d'après la loi des équivalents; le travail chimique devient seulement plus fort sur le plus petit zinc, qu'il ne l'était, lorsque les deux zincs étaient égaux. L'inverse a lieu quand, au lieu d'augmenter, on diminue les dimensions du second couple.

M. Daniell, qui a fait un grand nombre d'expériences sur des piles composées d'un plus ou moins grand nombre de couples, en mesurant les volumes des gaz dégagés, expériences dont les résultats ont été parfaitement d'accord avec ceux que

[1] Tome II, page 630.

la théorie indique, a remarqué que, lorsqu'on se borne à modifier la dimension du zinc amalgamé dans un couple, sans apporter aucun autre changement à ce couple, on n'altère pas sensiblement l'intensité du courant, parce qu'on ne change en rien la résistance du couple qui dépend essentiellement des dimensions du conducteur liquide et de celles du métal négatif.

Nous avons déjà vu que le nombre plus ou moins considérable de couples, dont on compose une pile, ne sert qu'à donner à une même combinaison voltaïque une force électromotrice plus ou moins grande; en effet, il résulte de tout ce qui précède que le nombre des couples, dont il faut composer une pile pour obtenir une force électromotrice donnée, est inverse de la force électromotrice de la combinaison voltaïque employée. Mais, le circuit une fois fermé, la quantité d'électricité qui y circule est la même que celle qui est produite par un seul couple de ce même circuit et est mesurée par l'action chimique qui a lieu dans ce couple, c'est-à-dire, par la consommation du métal positif qui, dans le circuit tout entier, est dans un rapport direct avec le nombre des couples, et par conséquent, inverse de la force électromotrice. Il y aurait donc une grande économie à trouver des combinaisons voltaïques dont les forces électromotrices et les résistances fussent telles, qu'un seul couple ou du moins un petit nombre, produisissent le même effet que plusieurs. Telle serait, par exemple, la combinaison amalgame de potassium acide sulfurique étendu et peroxyde de plomb qui, d'après Wheatstone, a la même force électromotrice qu'une série de cinq couples : amalgame de zinc, acide sulfurique étendu et cuivre. Mais cette combinaison, ainsi que d'autres du même genre, est dispendieuse, de sorte qu'on préfère se servir de celles où l'on emploie le zinc, lors même qu'il faut multiplier le nombre des couples. Toutefois, dans ce cas, une question importante se présente, c'est de savoir, étant données deux surfaces métalliques, zinc amalgamé et platine, en combien de couples on doit les diviser pour construire une pile qui produise, avec une résistance donnée, le maximum d'effet; qui, par exemple, décompose le maximum d'eau dans un voltamètre donné ou

produise le maximum de chaleur dans un fil d'une résistance donnée. La quantité d'action chimique reste constante, puisque la surface métallique totale qui est attaquée ne change pas; seulement, moins il y aura de couples plus il y aura d'effet utile. M. Poggendorff a résolu cette question d'une manière très-simple. Appelant l la résistance extérieure qu'il s'agit de surmonter, il remarque qu'on a toujours pour un couple $i = \frac{e}{r+l}$ et pour n couples semblables $I = \frac{ne}{nr+l}$. Or si on cherche quelle valeur doit avoir n pour que I soit un maximum, on trouve qu'il faut qu'elle soit telle que $l = nr$; c'est-à-dire que l'intensité du courant est à son maximum quand la résistance totale intérieure de la pile nr, est égale à celle qu'il faut que le courant surmonte extérieurement [1]. De là, on tire n en déterminant, au moyen du rhéostat r et l. Il en résulte que la valeur maximum de I, est $I = \frac{e}{2r}$, par conséquent, que le maximum d'effet utile extérieur qu'une pile voltaïque puisse produire, est la moitié du maximum d'intensité que son courant ou celui de l'un de ses couples peut atteindre quand il n'y a pas de résistance extérieure.

Si l'on veut comparer deux piles, quant à leur maximum d'effet utile, il n'y a qu'à déterminer dans chacune d'elles le maximum d'intensité du courant d'un des couples qui la composent : le rapport de ces maximums est le même que celui qu'on cherche. En effet, pour l'une ce maximum est :

$$I = \frac{e}{2r}, \text{ pour l'autre } I' = \frac{e'}{2r'}$$

$$\text{Or } \frac{I}{I'} = \frac{e}{e'} \cdot \frac{r'}{r}$$

Mais l'intensité maximum du courant d'un couple de la première pile est $i = \frac{e}{r}$, et pour la seconde, $i' = \frac{e'}{r'}$. Or, $\frac{i}{i'} = \frac{e}{e'} \cdot \frac{r'}{r} = \frac{I}{I'}$.

Ce résultat de la théorie est tout à fait d'accord avec celui que m'avait donné, en 1830, une expérience fondée sur le

[1] Voyez la note finale G.

simple raisonnement que, pour avoir le maximum d'effet, il faut que le nombre des couples soit tel, que le courant circule dans la pile ni plus ni moins vite que dans le conducteur qui réunit ses pôles, que, par conséquent, la résistance de la pile soit égale à celle de ce conducteur[1].

Il nous resterait, pour compléter ce que nous avons à dire des piles, à montrer que, comme pour un couple unique, leur force électromotrice évaluée par la tension de l'électricité qui est à l'état statique à chacun de leurs pôles quand, le circuit étant ouvert, les pôles sont bien isolés, est exactement proportionnelle à celle que fournissent les mesures de l'électricité à l'état dynamique. Or, c'est ce qui résulte des premiers travaux faits par Volta, puis par Coulomb et par Biot, sur la tension électrique des piles voltaïques que les physiciens, en partant de la théorie du contact, ont toujours trouvée être proportionnelle au nombre des couples, ainsi que nous le verrons dans le paragraphe suivant, où nous nous occuperons de cette théorie. Au reste, ce résultat, qui a été encore vérifié avec les piles nouvelles, est complétement indépendant de cette théorie, ainsi que le prouve l'analyse que nous venons de faire, et est d'accord avec celui que Kohlrausch a obtenu pour un seul couple.

Avant d'achever ce paragraphe où nous avons traité l'une des questions les plus importantes de l'électricité, il nous est impossible de ne pas remarquer que, si la théorie de la force électromotrice en général et de la pile voltaïque en particulier, ne laisse pas beaucoup à désirer, il n'en est pas de même des déterminations expérimentales des forces électromotrices et des résistances des diverses combinaisons voltaïques qui, sauf pour quelques-unes, ne présentent que peu d'accord entre les résultats. Cela tient à la diversité des méthodes employées, à l'influence de certaines causes perturbatrices qu'on ne sait pas toujours écarter, et enfin, à ce que la plupart des procédés sont fondés sur l'emploi du rhéostat, instrument qui a l'inconvénient que le fil, qui en est la partie essentielle, n'est pas toujours parfaitement homogène, et que par conséquent, à des

[1] Voyez plus haut, tome II, page 173.

longueurs égales de ce fil, ne correspondent pas toujours des résistances égales.

Une autre cause de confusion dans ce sujet, c'est l'absence d'une unité adoptée par tous les physiciens pour lui rapporter toutes les forces électromotrices. Peut-être à cet égard ce qui vaudrait le mieux, ce serait d'adopter le moyen proposé par Weber, à la suite des beaux travaux faits en commun avec Gauss, pour avoir une mesure absolue des courants électriques. Ce moyen consiste à faire passer le courant que l'on veut mesurer par un anneau de cuivre épais placé dans le méridien magnétique, et dont la résistance peut être considérée comme nulle, vis-à-vis de celle des autres parties du circuit dans lequel on le place; puis, on observe la déviation d'une petite aiguille aimantée placée au centre de ce cercle. Si le diamètre du cercle dépasse six ou huit fois la longueur de l'aiguille, on trouve l'intensité du courant, d'une manière tout à fait indépendante des dimensions de l'appareil et de l'intensité du magnétisme de l'aiguille, en multipliant la tangente de l'angle de déviation observé φ, par le rayon du cercle R et l'intensité absolue de la composante horizontale du magnétisme terrestre au point d'observation T, et en divisant le tout par 2π; ce qui donne la formule $\frac{R \times T}{2\pi}$ tang. φ M. Bunzen qui a employé cette manière de mesurer pour comparer les forces électromotrices de ses couples à celles d'autres couples, avait trouvé pour Marbourg T=1,88. Nous reviendrons, quand nous nous occuperons du magnétisme terrestre, sur cette méthode, qui a l'avantage de prendre dans la nature, c'est-à-dire, dans le magnétisme terrestre, l'unité dont on a besoin.

Nous avons dit que M. Pouillet l'avait cherchée dans le courant produit par un couple thermo-électrique cuivre et bismuth, dont les soudures étaient à 0° et à 100°. Pour comparer ce courant à celui d'un simple couple hydro-électrique cuivre et zinc dans l'eau acidulée, il avait d'abord évalué la résistance de ce circuit thermo-électrique, et l'avait trouvée égale à celle d'un fil de cuivre de 50 mètres de longueur et de 1 millimètre de diamètre. Puis, pour obtenir une même déviation

de 16 degrés au galvanomètre avec une pile hydro-électrique composée de 12 couples, il avait trouvé que la résistance totale du circuit devait être égale à celle d'un fil de platine de 180 mètres de longueur, équivalente elle-même à celle d'un fil de cuivre de 1 millimètre de diamètre, mais de 96,340 mètres de longueur. Il est facile de conclure de là, que l'intensité du courant produit par les 12 couples de la pile hydro-électrique est 1127 fois celle du courant du couple thermo-électrique, ce qui établit, entre la force électromotrice de ce couple et celle d'un seul des couples de la pile, le rapport de 1 à 94, bien rapproché de celui de 1 à 94,6 trouvé par Wheatstone.

Mais il ne suffisait pas d'avoir pour les courants une mesure commune. M. Pouillet a voulu aussi s'assurer directement de l'exactitude du principe, qu'à force électromotrice égale, l'intensité d'un courant mesurée par son effet, c'est-à-dire la déviation de l'aiguille d'un galvanomètre, est bien proportionnelle à la quantité d'électricité transmise. Dans ce but, il a mis dans le circuit d'un courant qui traversait un galvanomètre à sinus, une roue dont la circonférence unie, comme le pourtour d'un disque, présente des intervalles alternativement de métal et de bois, ces espèces de dents ou surfaces conductrices et non conductrices étant égales entre elles. Cette roue, portée sur un axe métallique qui communique avec les dents métalliques de la circonférence, peut recevoir un mouvement de rotation extrêmement rapide. L'un des pôles de la pile communique avec l'axe, et l'autre avec le fil du galvanomètre à sinus, lequel se termine par une petite languette qui presse un peu contre la circonférence de la roue. Pendant le repos, lorsque la languette touche une dent de métal, le courant passe en totalité, et on a, par exemple, une déviation de 60°; quand elle touche une dent de bois, le courant ne passe plus. Mais, en donnant un mouvement de rotation à la roue, on voit d'abord, si ce mouvement est lent, l'aiguille osciller ; puis à mesure qu'il s'accélère, les oscillations diminuent d'amplitude, et on arrive à une certaine vitesse pour laquelle l'aiguille reste parfaitement fixe. A partir de ce point, on peut augmenter la vitesse indéfiniment sans que l'aiguille cesse d'être immobile et de marquer la même dé-

viation. Dans la même expérience, où la déviation était de 60° quand le disque était en repos, on a eu une déviation fixe de 25°·45′, aussi bien, quand la roue faisait *cinq* tours par *minute* que lorsqu'elle en faisait *vingt* par *seconde*. Mais le sinus de 60° étant double de celui de 25°·45′, il en résulte que, par le mouvement, la force du courant a été réduite à moitié. Or, qu'a-t-on fait dans cette expérience, sinon de réduire à moitié le temps pendant lequel passe un courant, et on a réduit ainsi sa force également à la moitié. D'un autre côté, il est évident que la quantité d'électricité qui passe dans un circuit est proportionnelle au temps; donc, une quantité d'électricité moitié produit un effet moitié, et il est bien vrai que la quantité d'électricité qui constitue un courant, est proportionnelle à la force de ce courant mesurée par la déviation qu'il exerce sur l'aiguille d'un galvanomètre.

Cette même loi se vérifie en prenant, comme nous avons démontré qu'on pouvait le faire, pour en déduire la quantité d'électricité, la quantité d'action chimique qui lui correspond, par exemple, la quantité d'eau ou de sulfate de cuivre décomposés, et en plaçant un galvanomètre à sinus ou à tangente dans le circuit. On peut même établir un rapport entre ces deux manières de mesurer la quantité d'électricité, et évaluer ainsi, en unités de courant, celle qu'exige la décomposition d'un certain poids d'eau, d'un gramme, par exemple. C'est ce qu'a fait M. Pouillet en opérant comme suit :

On commence par déterminer en longueurs de fil de cuivre les résistances de la pile, du liquide soumis à la décomposition et de tous les autres conducteurs; puis, on note l'instant, où le voltamètre étant placé dans le circuit, commence le dégagement du gaz. On observe la déviation de l'aiguille du galvanomètre qui demeure constante, et on laisse marcher l'expérience jusqu'à ce qu'on ait obtenu un volume convenable d'hydrogène, le seul des deux gaz qu'on recueille pour plus d'exactitude, afin d'éviter la recomposition des gaz mélangés. Le tableau suivant montre que le produit du temps nécessaire pour obtenir le même volume d'hydrogène par la force du courant, est un nombre constant, et cela, quelle que soit la cause qui fasse varier

la force du courant, aussi bien quand c'est le degré de conductibilité du liquide à décomposer ou la nature des électrodes, que lorsque c'est la puissance de la pile. Il en résulte donc, puisque, d'après la loi que nous venons d'établir, la quantité d'électricité est proportionnelle à la force du courant, que la quantité d'électricité qu'exige la décomposition d'un certain poids d'eau est toujours la même, que l'eau soit plus ou moins conductrice, et que l'opération dure par conséquent plus ou moins longtemps. Voici ce tableau :

LIQUIDE.	MÉTAL DES ÉLECTRODES.		TEMPS pour 2c. c. d'hydrogène.	DÉVIATION DU GALVANOMÈTRE.		PRODUIT de l'intensité par le temps.
	Positif.	Négatif.		Angle.	Sinus.	
Eau distillée avec acide sulfurique.	Platine	Platine	498″	5°50	0,1016	50,60
	id.	*id.*	510	5 40	0,0987	50,54
Liquide précédent étendu d'un volume d'eau distillée.	*id.*	*id.*	725	4	0,0697	50,53
	id.	*id.*	728	4	0,0697	50,74
	id.	*id.*	919	3 10	0,0552	50,73
Eau ordinaire avec acide sulfurique.	*id.*	*id.*	417	6 50	0,1190	49,62
	id.	*id.*	423	6 45	0,1175	49,70
	Cuivre	*id.*	251	11 20	0,1965	49,32
	id.	*id.*	247	11 30	0,1994	49,25
	id.	*id.*	247	11 30	0,1994	49,25
	Zinc	*id.*	239	12 »	0,2080	49,71
	id.	*id.*	258	11 »	0,1908	49,22
	Platine	*id.*	684	4 10	0,0724	49,50
Acide sulfurique étendu.	*id.*	*id.*	77	40 »	0,6428	49,50

Maintenant, pour avoir la mesure de la quantité d'électricité, il faut savoir que la résistance totale du circuit, dans les deux premières expériences du tableau, était équivalente à celle de 5679 mètres du fil de cuivre de 1 mill. de diamètre, dont 148 pour la résistance de la pile et du galvanomètre à sinus, et 5531 pour celle du liquide soumis à la décomposition. Quant à l'intensité du courant, elle était 2,665 fois celle du courant de la source thermo-électrique pris pour unité, dont le circuit présente une résistance égale à celle de 20 mètres du même fil de cuivre. Or, avec cette force de courant, on a obtenu

$2^{cent.\ c.}$ d'hydrogène dans 500″, et, comme un gramme d'eau renferme $1241^{c.\ c.}$, 61 d'hydrogène, il faudrait, pour en opérer la décomposition, une quantité d'électricité représentée par $2{,}665 \times \frac{1241^{cc.}\ 61}{2} = 1654{,}445$, c'est-à-dire égale à plus de 1600 fois celle qui passe pendant 500″ dans la source prise pour unité; et si l'on prend pour unité de temps la minute, on trouve que la quantité d'électricité nécessaire pour décomposer un gramme d'eau est 13787 fois la quantité d'électricité qui passe en 1 minute dans un circuit bismuth et cuivre, dont la résistance totale est équivalente à celle d'un fil de cuivre de 1 millimètre de diamètre et de 20 mètres de longueur, et dont les soudures ont une différence de température de 100°. Et ce nombre est toujours le même, que le gramme d'eau appartienne à une solution bonne ou mauvaise conductrice, et qu'il soit décomposé par une pile forte ou faible [1].

Il est probable, comme nous le verrons dans le dernier paragraphe de ce chapitre, que la quantité d'électricité nécessaire pour décomposer un gramme d'eau est égale à celle que produit sa décomposition opérée par une action chimique ordinaire,

[1] M. Weber a également déterminé la quantité absolue d'électricité nécessaire pour décomposer un certain poids d'eau, en prenant pour unité la quantité d'électricité qui doit passer, dans l'unité de temps (une seconde), par la section transversale d'un conducteur qui représente l'unité de surface, pour produire à distance des effets identiques à ceux que produit la quantité de magnétisme qui sert d'unité de mesure. Il faut donc observer l'effet magnétique d'un courant électrique, pendant le même temps qu'il décompose une certaine quantité d'eau. Nous avons déjà vu plus haut comment Weber rapporte cet effet magnétique à celui du magnétisme terrestre au lieu de l'observation. Malheureusement, les résultats de Weber ne sont pas comparables à ceux de Pouillet, le rapport entre les unités différentes adoptées par ces deux physiciens n'ayant pas été déterminé. Le nombre trouvé par Weber pour l'*équivalent électro-chimique* de l'eau est 0,00936. Il l'obtient, en divisant la quantité d'eau décomposée exprimée en milligrammes, par la quantité absolue d'électricité correspondante évaluée au moyen de la formule que nous avons donnée plus haut. Dans ses expériences, la quantité d'eau décomposée a été de 14 milligrammes en moyenne, et la quantité absolue d'électricité de 1500 en moyenne aussi. La durée de chaque expérience était d'environ 1200 secondes.

ce qui explique la puissance de ce mode de production de l'électricité.

§ 7. Électricité de contact. — Piles sèches.

Nous avons déjà plus d'une fois fait allusion à la théorie du contact, dans laquelle on attribue la production de l'électricité dans la pile voltaïque au contact des deux corps solides hétérogènes qui font partie de deux couples consécutifs ou qui, dans cette théorie, constituent eux-mêmes le couple [1]. Nous avons cité déjà un grand nombre de faits de nature à démontrer que le contact à lui seul ne suffit pas pour dégager l'électricité, mais qu'il faut en outre une action, action qui, dans la pile, est une action chimique. Cependant, il est encore un certain nombre de phénomènes qui semblent, au premier abord, ne pouvoir être expliqués qu'en admettant que, par lui-même, le contact de deux corps hétérogènes détermine, indépendamment de toute action, un développement d'électricité; la production de l'électricité dans les piles sèches est de ce nombre. Ce sont ces faits que nous allons examiner en traitant la question générale de l'électricité de contact.

Nous avons déjà rappelé l'expérience fondamentale de Galvani [2], dans laquelle on fait éprouver une vive commotion à une grenouille convenablement préparée, en touchant ses nerfs lombaires mis à nu avec l'extrémité d'un fil de métal, de cuivre par exemple, et les muscles de ses cuisses mis également à nu avec l'extrémité d'un fil d'un métal différent tel que du fer, ces deux métaux se touchant eux-mêmes par leur autre extrémité. Une autre expérience plus ancienne, imaginée par Sulzer, consiste à placer la langue entre deux rondelles de métal différentes par leur nature, l'une d'argent, l'autre de zinc par exemple, puis à établir un contact métallique entre elles en les faisant se toucher extérieurement, tout en laissant la langue entre les

[1] Dans la théorie chimique, le couple est formé des métaux qui plongent dans le même liquide (voyez la note de la page 600).

[2] Tome I, page 27, figure 18.

deux rondelles. Au moment du contact on éprouve une saveur piquante, et on a la sensation d'une lueur instantanée si on tient les yeux fermés. Ce double effet, ainsi que la commotion imprimée à la grenouille, sont des phénomènes électriques, puisqu'on peut les produire d'une manière identique par l'action directe de l'électricité. Or, quelle est la cause de cette production d'électricité? Elle est, suivant Volta, dans le contact des deux métaux hétérogènes; et la grenouille, dans la première expérience, la langue, dans la seconde, ne servent qu'à transmettre les électricités dégagées et à en accuser la présence, c'est-à-dire qu'elles ne jouent d'autre rôle que celui de conducteurs et d'électroscopes.

Volta admet donc que c'est au contact des deux conducteurs solides que se développe la force électromotrice; force en vertu de laquelle l'un des corps se constitue dans un état positif, et l'autre dans un état négatif; les deux électricités positive et négative étant nécessairement égales, de telle façon que si l'une est représentée par $+e$, l'autre l'est par $-e$, $+e$ et $-e$ ajoutés faisant 0. Quant à la valeur de e, ou, ce qui revient au même, de la différence entre les états électriques des deux corps, elle dépend de leur nature relative, mais elle est la même, quelle que soit la charge électrique absolue de chacun d'eux. Ainsi, si dans leur contact deux lames, l'une de zinc, l'autre de cuivre, prennent, la première e d'électricité positive, la seconde e d'électricité négative, la différence entre les états électriques des deux lames sera $2e$, chacune des électricités étant affectée de son signe. La quantité d'électricité dont est chargé le zinc vient-elle à augmenter de manière à être ne, celle du cuivre en contact avec ce zinc se trouve alors être $(n-2)e$, de manière que la différence soit toujours $2e$. Ce second principe permit à Volta d'expliquer l'accumulation de l'électricité dans la pile. En effet, soient un certain nombre de couples formés chacun de deux rondelles superposées, l'une de cuivre en dessous, l'autre de zinc en dessus; dans chaque couple le cuivre a $(-e)$ et le zinc $(+e)$; mais si le cuivre communique avec le sol, son électricité est o et celle du zinc est $+2e$. Plaçons ces divers couples les uns au-dessus des autres, de telle

façon que le cuivre soit toujours au-dessous du zinc, et séparons le zinc du couple inférieur, du cuivre du couple supérieur, par une rondelle de drap ou de carton humide qui, en prévenant le contact métallique entre les deux métaux appartenant à deux couples différents, laisse cependant passer l'électricité du premier au second; nous construisons ainsi la pile à colonnes[1]. Il en résultera que le cuivre du second couple, au lieu d'avoir un état électrique 0, aura le même état électrique $2e$ que le zinc du premier, et le zinc du second aura alors $+ 4e$ d'électricité, en vertu de la force électromotrice qui s'exerce par son contact avec son cuivre. Ce $4e$ sera aussi l'état électrique du cuivre du troisième couple dont le zinc aura ainsi $+ 6e$ d'électricité; et, s'il y a n couples, le zinc du dernier aura $+ 2ne$ d'électricité, le cuivre du premier qui communique avec le sol ayant 0. La pile, dans ce cas, n'est chargée que d'électricité positive, celle-ci allant en augmentant de la base au sommet; elle ne serait chargée que d'électricité négative si les couples avaient été placés dans un ordre inverse, les zincs étant au-dessous des cuivres. Si les deux extrémités ou pôles de la pile sont isolés tous les deux, la distribution de l'électricité s'y fait différemment; on trouve l'une des moitiés de la pile chargée d'électricité négative et l'autre de positive. Le calcul de cette distribution est facile à faire, en partant des mêmes principes et en se rappelant que la somme des électricités libres prises avec leur signe, tant positive que négative, doit toujours être égale à 0, puisqu'il ne s'en est point écoulé dans le sol[2].

L'observation directe faite par Volta, puis plus tard par Coulomb et par Biot, confirme d'une manière assez approximative la distribution de l'électricité dans une pile, telle qu'elle est déduite de cette théorie. Mais il est remarquable que cette dis-

[1] Tome I, page 28, figure 17.

[2] Voici ce calcul pour le cas de 8 couples : soit x l'électricité du premier cuivre, $2e$ étant toujours la différence entre les états électriques d'un cuivre et d'un zinc en contact :

1er cuivre.	x
1er zinc.	$x + 2e$
2e cuivre.	$x + 2e$

tribution est exactement la même que celle que nous avons vu être la conséquence d'une toute autre hypothèse sur la nature de la force électromotrice. Cela doit être en effet, car ce qui sépare les partisans de la théorie chimique de ceux de la théorie du contact, est la cause et le siége même de la force électromotrice, mais non la manière d'envisager le mode d'accumulation des forces électromotrices des différents couples, point sur lequel ils sont d'accord. La seule différence, c'est que dans la théorie chimique on ne fait qu'ajouter les unes aux autres les forces électromotrices des différents couples successifs, ce qui doit nécessairement avoir lieu, tandis que, dans la théorie du contact, il faut introduire une hypothèse difficile à vérifier directement, c'est que la différence entre les états électriques de deux métaux en contact est toujours la même, quelle que soit la quantité absolue d'électricité dont ces deux métaux sont chargés.

Comme on peut le voir, dans la théorie voltaïque les liquides dont la pile est chargée ne jouent que le rôle de conducteurs; ils ne sont nullement électromoteurs, l'origine de l'électricité étant toute dans les deux métaux du couple. Sans s'arrêter aux objections indirectes contre cette manière d'expliquer la production de l'électricité dans la pile, telles que la relation si intime qui unit la quantité d'électricité dégagée avec la quantité d'action chimique produite, la nécessité que les liquides aient un rapport chimique avec l'un au moins des éléments du couple pour qu'il y ait effet électrique, la simple conductibilité ne suffisant pas[1], points que nous avons déjà traités en

2e zinc.	$x + 4\,e$
3e cuivre.	$x + 4\,e$
3e zinc.	$x + 6\,e$
4e cuivre.	$x + 6\,e$
4e zinc.	$x + 8\,e$

Somme des électricités $= 0 = 8\,x + 3\,2\,e$ d'où $x = -4\,e$.

Cette valeur de x étant connue, on trouve la charge électrique de chaque disque très-facilement. Ainsi celle du premier cuivre étant $4\,e$ d'électricité négative, celle du quatrième zinc est $4\,e$ d'électricité positive, celle du second zinc et du troisième cuivre est 0, etc.

[1] En effet, il résulte des nombreuses expériences de M. Faraday en particulier,

détail, et sur lesquels il est inutile de revenir; nous nous bornerons à insister sur deux difficultés péremptoires que nous paraît présenter la théorie voltaïque de la pile.

La première est l'impossibilité de dresser une échelle du pouvoir électromoteur des corps solides conducteurs. Volta avait cru réussir à en dresser une dans laquelle chaque corps était négatif dans son contact avec ceux qui suivaient, et positif avec ceux qui précédaient. Mais cette échelle n'était vraie qu'autant que le conducteur interposé entre les métaux du couple était de l'eau ou de l'air humide; elle n'exprimait que la facilité plus ou moins grande de chaque corps à décomposer l'eau ou à s'oxyder sous l'influence combinée de l'oxygène et de l'eau. Elle n'était plus exacte, dès qu'au lieu d'eau, on prenait pour conducteur humide un acide concentré, tel que l'acide nitrique, un sulfure dissous, tel que le sulfure de potassium, un chlorure fondu, etc. En un mot, l'ordre des pouvoirs électromoteurs change toujours avec la nature de la réaction chimique qui a lieu entre les métaux des couples et le liquide dont la pile est chargée. Marianini et plusieurs autres physiciens ont cherché à répondre à cette objection, en prétendant que la décomposition opérée dans le liquide qui sépare les couples par l'électricité que produit le contact dans ces couples, en déposant sur la surface de leurs métaux des corps étrangers, altère leur faculté électromotrice. Mais si les choses se passaient ainsi, la nature de l'électricité prise par chaque métal du couple, ou, ce qui revient au même, la direction du courant dans la pile, devraient être les mêmes au premier moment, quel que fût le liquide, puisqu'elle ne dépendrait que de la nature relative des deux métaux. Or il n'en est point ainsi; d'ailleurs le changement dans la polarité des métaux du couple a lieu quand même leur surface n'est point altérée, le composé qui s'y forme étant dissous à mesure de sa formation.

que des couples formés de deux métaux différents en contact, sont inactifs lors même qu'ils plongent dans le liquide le plus conducteur, si ce liquide n'est pas capable d'exercer une action chimique sur l'un ou l'autre des métaux du couple; tels sont un couple fer et platine dans une dissolution de sulfure de potassium, un couple fer et cuivre dans une dissolution de potasse, etc.

Davy avait déjà remarqué la différence qui existe dans le sens du courant selon que le conducteur liquide d'une même pile est une dissolution acide ou un sulfure liquide. J'ai moi-même trouvé un grand nombre d'exemples semblables, et Faraday les a tellement multipliés qu'il est impossible de voir autre chose dans l'échelle de Volta, comme nous l'avons dit, qu'une classification des métaux, d'après leur degré d'affinité pour l'oxygène.

La seconde objection est la production de l'électricité dans un couple unique, sans qu'il y ait contact entre les deux métaux qui la composent. Nous en avons cité bien des exemples, tels, en particulier, que celui d'une lame de zinc et d'une lame de platine qui, plongées dans de l'eau acidulée, décomposent l'iodure de potassium qu'on place entre les deux lames à l'endroit où elles devraient se toucher métalliquement pour produire de l'électricité, selon la théorie du contact[1]. Nous pouvons, aux expériences de ce genre, ajouter celle non moins curieuse de la production de l'étincelle électrique au moment où l'on établit le contact entre les deux éléments d'un couple unique. On peut même rendre cette étincelle très-forte en plongeant dans l'acide sulfurique étendu deux grandes surfaces cylindriques de cuivre entre lesquelles on en place une de zinc amalgamé, et en réunissant le zinc et le cuivre au moyen de deux fils de cuivre qui leur sont respectivement soudés; au moment où, l'un étant plongé dans du mercure, on y plonge l'autre, il y a une vive étincelle; l'état de tension électrique préexistait donc évidemment au contact des deux métaux, car, sans cela, il n'y aurait pas pu y avoir production d'électricité, ni par conséquent d'étincelle au moment de l'établissement du contact; il n'aurait pu y en avoir qu'à la rupture.

Devant tous ces faits et d'autres du même genre dont l'électrochimie abonde, les partisans de la théorie du contact ne pouvant nier l'action électromotrice des liquides dans la pile voltaïque, en sont venus à étendre le principe de Volta au con-

[1] Tome II, page 606.

tact des liquides et des solides, et même à admettre, qu'il y a plus d'électricité développée dans le contact des solides et des liquides que dans celui des solides entre eux. C'est ce qu'ont fait, en particulier, Fechner, Karsten, Buff et Péclet, en se fondant sur leurs expériences propres et sur d'autres, faites antérieurement par M. Becquerel. Nous avons déjà parlé des expériences de Becquerel, ainsi que de celles de Karsten et de Buff, dans lesquelles on recueille avec le condensateur l'électricité dégagée en plongeant dans des liquides divers des substances solides différentes. Nous avons vu qu'elles rentraient dans le dégagement de l'électricité qui accompagne les actions chimiques. Toutefois, nous y reviendrons dans un instant, en même temps que nous parlerons de celles de M. Péclet et de quelques autres, dont les résultats ne semblent pas au premier abord d'accord avec les lois qui régissent la production chimique de l'électricité. Nous devons auparavant examiner la question importante, de savoir, s'il y a ou non un effet électrique résultant du simple contact de deux corps solides.

Volta ne s'était pas contenté d'établir ce principe indirectement en expliquant ainsi, soit l'expérience de Galvani, soit celle de Sulzer, soit le développement d'électricité dans sa pile. Il avait cherché à le prouver par des expériences directes. Voici les trois modes d'opérer qu'il avait imaginés et dont on s'est servi après lui. Dans tous également, on fait usage d'un condensateur, dont les plateaux en cuivre doivent être bien dorés pour être à l'abri de l'action oxydante de l'air humide.

Le premier mode consiste à tenir entre ses doigts, qui doivent être humides pour être conducteurs, une plaque de zinc, soudée à une plaque de cuivre, avec laquelle on touche l'un des plateaux du condensateur[1], l'autre étant mis en communication avec le sol. On trouve le plateau touché, chargé d'électricité négative, la positive que le zinc a prise par son contact avec le cuivre étant passée dans le sol. On peut également

[1] On peut toucher directement avec la plaque de zinc le plateau du condensateur, celui-ci servant de métal négatif.

placer un conducteur humide, tel que du carton humecté, sur le plateau des condensateurs et le toucher avec le zinc, tandis qu'on tient la lame de cuivre soudée au zinc; on charge alors le plateau d'électricité positive, tandis que la négative va dans le sol. Il est facile de voir que ces expériences se concilient aussi bien avec la théorie chimique qu'avec celle du contact, si on a égard à l'action chimique qu'exerce sur le zinc, soit l'humidité de la main, soit le conducteur humide.

Le second mode d'opérer consiste à avoir deux disques isolés, l'un de zinc, l'autre de cuivre, à les mettre en contact; puis, à les séparer, et à porter l'un d'eux au condensateur en déchargeant l'autre; après avoir répété plusieurs fois cette série d'opérations, on finit, quand l'expérience a réussi, ce qui est assez rare, par accumuler, sur le plateau du condensateur, de l'électricité positive quand on l'a touché avec le disque de zinc, et de la négative quand on l'a touché avec le disque de cuivre.

Le troisième mode, qui a beaucoup de rapports avec le second, mais qui réussit mieux en général, étant moins capricieux, consiste à prendre pour plateaux du condensateur deux disques de nature différente, l'un de cuivre par exemple, et l'autre de zinc, puis à les réunir au moyen d'un petit arc métallique tenu par un manche isolant. Cette réunion opérée et l'arc étant enlevé, on trouve que le disque de cuivre s'est chargé d'électricité négative et celui de zinc d'électricité positive. Il faut remarquer que, quoiqu'ils soient superposés, les deux disques n'ont entre eux aucun autre contact métallique que celui qu'on détermine au moyen de l'arc isolé, à cause de la couche de vernis qui les sépare.

Dans les deux derniers modes d'opérer, on ne peut, comme dans le premier, expliquer la production de l'électricité par l'action chimique d'un liquide sur l'un ou l'autre des métaux en contact, puisqu'il n'y a aucun liquide en présence. On est alors obligé, dans la théorie chimique, de recourir à l'action chimique de l'air humide. Voyons donc comment on peut rendre compte de cette manière, du dégagement d'électricité qui a lieu dans le troisième mode. Nous reviendrons ensuite

au second. Il est d'abord facile de constater la nécessité qu'il y a, pour obtenir un effet électrique, que la surface de l'un des métaux au moins soit en contact avec l'air ou avec un fluide élastique, à défaut de liquide. Pfaff et Fechner ont bien trouvé qu'en plaçant les deux plateaux du condensateur dans le vide ou dans de l'oxygène bien desséché, on avait encore un effet; mais on sait combien il est difficile, pour ne pas dire impossible, de se débarrasser ainsi de toute vapeur aqueuse. Le moyen le plus sûr d'éviter tout contact entre le zinc et la vapeur aqueuse, c'est de recouvrir sa surface extérieure d'une couche de vernis très-épaisse, après avoir eu la précaution de souder au zinc une petite tige de platine qui permette d'établir une communication métallique entre lui et le disque de cuivre. Si la couche de vernis est assez épaisse pour que l'accès de l'air ou de l'humidité à la surface métallique ne puisse avoir lieu en aucun point, on a beau établir la communication métallique entre le disque de zinc et le disque de cuivre, ou toucher le platine soudé au zinc avec le doigt en faisant également communiquer avec le sol le disque de cuivre; on n'obtient aucun signe électrique; cependant, suivant la théorie du contact, le zinc devrait se charger d'électricité positive et le cuivre de négative. Il y a plus; ce disque de zinc ainsi verni, devenu inactif, peut servir de plateau de condensateur comme un plateau de laiton doré, lorsqu'on met la tige de platine qui lui est soudée en communication avec une source électrique; ce qui prouve que ce n'est pas par défaut de sensibilité qu'il n'accuse pas de signes électriques, quand on le met en contact avec le cuivre. On ne peut pas dire non plus que ce soit le contact avec le zinc de la gomme laque dont est fait le vernis, qui modifie son état électrique, puisque la gomme laque est isolante et que d'ailleurs la couche de vernis semblable, sauf qu'elle est plus mince, qui est sur sa surface inférieure, ne la modifie pas[1].

[1] M. Péclet prétend avoir obtenu encore des signes électriques en recouvrant de plusieurs couches de vernis à la gomme laque la surface du zinc; mais on ne peut être assuré que l'air n'a pas d'accès jusqu'au métal par l'effet de quelques solutions de continuité, que lorsque la couche est assez épaisse pour que le zinc

Une autre preuve de la nécessité de ce contact entre la surface du zinc et l'air ou l'humidité ambiante, est qu'on n'obtient aucun signe électrique en recouvrant d'une couche de cuivre, et encore mieux d'or, toute la surface du disque de zinc. En d'autres termes, un plateau fait de zinc doré devient tout à fait inactif. Cependant, en touchant la surface extérieure de ce plateau avec le doigt, je donne écoulement dans le sol à l'électricité négative dont l'or s'est chargé dans son contact avec le zinc, tandis que la positive du zinc est dissimulée et condensée, par l'effet de la négative du second plateau du condensateur qui communique avec le sol. Il devrait donc y avoir une charge d'électricité positive dans le plateau de zinc doré, et cependant il n'y a absolument aucun signe électrique. Il faut avoir soin que la couche d'or, dont la surface du zinc est recouverte, soit assez épaisse pour ne présenter aucune solution de continuité qui permette à l'air humide d'avoir accès, même en un point, à la surface du zinc.

La nécessité d'un contact immédiat entre la surface du métal oxydable et l'air plus ou moins humide ambiant étant bien démontrée, voyons comment on peut se rendre compte de la production de l'électricité dans la théorie chimique. Prenons le cas où c'est un disque de zinc qui forme l'un des plateaux du condensateur; il en sera de même pour tout autre métal susceptible de s'oxyder. Ce disque polarise les molécules de la couche d'humidité en contact avec sa surface, comme une lame de zinc polarise les molécules de l'eau dans laquelle elle est immergée. Au moment où l'on met le zinc en contact avec le disque de cuivre du condensateur, on constitue un couple, il s'opère une décharge, l'électricité négative passe du zinc dans le cuivre en contact, le zinc s'oxyde et l'électricité positive, devenue libre, ne pouvant s'écouler, puisque le milieu où elle s'est dégagée, au lieu d'être comme dans le cas d'un vrai couple voltaïque liquide et conducteur, est gazeux et isolant, demeure

ne soit plus visible. Il n'est pas nécessaire d'augmenter l'épaisseur de la couche de vernis qui est sur la surface condensante du plateau, parce que l'air n'y a pas d'accès, et qu'en augmentant cette épaisseur on diminuerait la sensibilité du condensateur.

Digitized by Google

à la surface même du zinc où elle est condensée par la négative qui a passé dans le disque de cuivre. De là vient qu'en séparant les deux plateaux du condensateur, on trouve de l'électricité positive accumulée sur le zinc, et de la négative sur le cuivre.

Cette explication, qui fait rentrer d'une manière très-simple dans la théorie chimique, le développement d'électricité qui a lieu dans le cas qui vient de nous occuper, repose sur la supposition que l'un des métaux dont sont faits les disques du condensateur s'oxyde à l'air humide, et que cette oxydation développe assez d'électricité pour charger l'instrument. Quant au premier point, il est facile à prouver; il suffit de laisser pendant un temps plus ou moins long un métal, dont la surface est bien polie, en contact avec de l'air même en apparence très-sec, pour s'apercevoir que cette surface s'est ternie, et cela, lors même qu'il s'agit de métaux très-peu oxydables, tels que le cuivre et l'argent. Quant au second, il résulte d'expériences de Faraday et de Becquerel faites d'une manière toute différente, et que nous rapporterons dans le paragraphe suivant, que la proportion dans laquelle il suffit qu'un métal s'oxyde pour dégager une quantité d'électricité capable de charger un condensateur, est infiniment petite, puisque la décomposition d'un seul milligramme d'eau résultant de l'oxydation d'une quantité de métal équivalente environ à 4 milligrammes pour le zinc, produit assez d'électricité pour charger 20 mille fois un carreau magique dont les surfaces armées auraient un mètre carré, de manière que chaque charge donnât une étincelle longue de 1 centimètre; l'oxydation de 1 milligramme de zinc ne le chargerait donc que 5 mille fois. Or, pour charger un condensateur sans étincelle sensible, mais de manière seulement à faire écarter les feuilles d'or de l'électroscope, il suffirait de la dix-millième partie de la charge qui donne une étincelle de 1 centimètre; par conséquent l'oxydation de $\frac{1}{10000}$ de milligramme de zinc produirait assez d'électricité pour charger 5 mille fois le condensateur. Dès lors, on peut comprendre combien il est difficile d'éviter la si faible oxydation qui suffit pour produire l'électricité qu'accuse un condensateur. Remarquons en-

core que l'étendue de la surface métallique qui est en contact avec le milieu oxydant n'exerce aucune influence sur la charge du condensateur, laquelle ne dépend, comme nous l'avons vu, que de l'intensité de la force électromotrice qui naît de l'action mutuelle de ce milieu et du métal; c'est ce qui explique pourquoi il suffit que quelques points de cette surface soient en contact avec le milieu pour que le condensateur se charge.

Ajoutons encore que lors même que le métal positif ne serait pas susceptible de s'oxyder à l'air libre dans son état naturel, le fait qu'il est uni métalliquement à un autre métal qui forme le second des plateaux du condensateur dont lui-même est le premier, facilite son oxydation, exactement de la même manière qu'elle est facilitée quand ce métal, plongé dans un liquide électrolytique, est uni métalliquement avec un métal moins attaquable qui plonge dans le même liquide[1]. La seule différence, c'est qu'il n'y a qu'une décharge au lieu d'un courant continu, mais nous avons prouvé que cela ne change rien à la nature des phénomènes qui ont lieu[2].

Il est inutile maintenant de citer les nombreuses expériences par lesquelles Fechner, Pfaff, Belli et tant d'autres ont cherché à démontrer la vérité de la théorie de Volta au moyen de la troisième manière d'opérer que nous venons d'analyser, puisque le résultat de ces expériences n'est point en opposition avec la théorie chimique, comme nous venons de le démontrer. Nous nous arrêterons seulement sur quelques faits qui semblent s'y plier moins facilement.

M. Peltier ayant pris, pour plateaux d'un condensateur, un disque d'or et un disque de platine, et les ayant fait communi-

[1] Tome II, page 614.

[2] Il serait très-intéressant de combiner un appareil qui permît de charger et de décharger très-rapidement et un très-grand nombre de fois de suite un condensateur, dont l'un des plateaux serait de zinc très-poli, et de voir si le plateau ne serait pas plus oxydé qu'un plateau semblable laissé tout isolé dans le même milieu. Au reste, la grande rapidité avec laquelle les métaux, tels que le fer, s'oxydent dans l'air quand ils sont en contact avec un métal moins oxydable, tel que du plomb ou du cuivre, ne laisse point d'incertitude sur le résultat de l'expérience.

quer au moyen d'un fil de platine isolé, trouva que le premier s'était chargé d'électricité positive, et le second d'électricité négative. Ayant préparé ensuite quatre disques en verre, recouverts l'un d'une feuille de platine, le second d'une feuille d'or, le troisième d'une feuille d'argent, le quatrième d'une feuille d'étain, il s'en servit en les combinant les uns avec les autres deux à deux comme plateaux d'un condensateur, et il trouva, en les mettant en communication avec une même source d'électricité, que les uns se chargeaient plus facilement de l'électricité négative que les autres, d'où il conclut qu'il existe entre les métaux une différence quant à leur faculté de coercer la même électricité. Ainsi, les quatre métaux essayés devraient être placés dans l'ordre suivant, quant à leur faculté de coercer l'électricité négative : platine, argent, or et étain. M. Peltier avait encore conclu de ses recherches que, dans leur état d'équilibre naturel, les métaux possèdent des quantités différentes d'électricité, soit positive, soit négative, suivant leur nature, et que c'est à cette électricité inhérente aux particules des métaux, et qui en serait inséparable, que seraient dus les effets électriques de contact dans lesquels on n'aperçoit aucune trace d'action chimique. Mais il est facile de voir que tous les effets observés par M. Peltier, tiennent à une opposition entre les forces électromotrices des sources avec lesquelles on charge le condensateur, et celle qui naît du contact de l'air humide avec les métaux dont sont faits les plateaux du condensateur. Néanmoins, le fait de la charge négative que prend le disque de platine dans son contact avec le disque d'or mérite de fixer un instant notre attention.

M. Becquerel a obtenu le même résultat que Peltier; mais d'un autre côté, en se servant d'un condensateur fait avec deux plateaux de platine, il n'a observé aucun signe électrique, en touchant l'un des plateaux avec une lame d'or tenue d'une main, et en touchant l'autre plateau avec un doigt humecté d'eau distillée. Ce n'est donc pas dans le cas observé par M. Peltier, et vérifié par M. Becquerel, le contact de l'or et du platine qui détermine la charge électrique. On doit à M. E. Becquerel une expérience qui a mis sur la voie de la véritable explication du fait dont il s'agit. Un condensateur, dont les

deux plateaux sont en platine, ne donne aucun signe à l'électroscope quand on les a touchés avec le doigt, mais si l'on enlève l'un des plateaux, et qu'on le plonge pendant quelques instants dans de l'hydrogène, on trouve après l'avoir replacé et avoir établi la communication métallique entre les deux plateaux, que celui qui a été dans l'hydrogène s'est chargé d'électricité positive et l'autre de négative. Cet effet dure quelque temps, puis diminue peu à peu, par suite du séjour des plateaux dans l'air atmosphérique. A chaque immersion nouvelle du plateau dans l'hydrogène, on obtient le même résultat.

Cette double propriété du platine d'être tantôt positif, tantôt négatif, suivant que sa surface est recouverte d'hydrogène ou d'oxygène[1], tient, sans aucun doute, à la faculté que possède ce métal de déterminer la combinaison de l'oxygène et de l'hydrogène par son contact avec ces gaz, et même la décomposition de l'eau comme dans la pile à gaz de Grove, quand il est en contact avec un de ces gaz et l'eau. Le disque recouvert d'hydrogène se conduit donc comme un disque positif de zinc qui formerait l'un des plateaux du condensateur, l'autre étant un disque de platine ordinaire. Le disque de platine qui n'a point été plongé dans l'hydrogène, mais simplement dans l'air atmosphérique, condense à sa surface de l'oxygène ainsi que nous l'avons établi[2]; que ce gaz forme une légère couche d'oxyde, ou reste à l'état gazeux sur la surface du platine, peu importe; en tout cas, il agit, sous l'influence du platine, sur la vapeur aqueuse en contact avec lui et la décompose; c'est un effet de polarité secondaire analogue encore à celui qui a lieu dans la pile à gaz. Il doit en résulter que le disque de platine, quand il est mis en contact avec un disque d'or, ces deux disques formant les deux plateaux du condensateur, doit donner à ce disque l'électricité positive et garder la négative. Si les plateaux du condensateur sont tous les deux des disques de platine semblables et recouverts par conséquent tous les deux

[1] Nous disons d'oxygène, quoique ce soit en réalité d'air atmosphérique; mais cela revient au même.

[2] Tome II, pages 352 et suivantes.

d'oxygène, il n'y a aucun effet. Le contact d'une lame d'or qu'on tient entre les doigts, avec l'un des deux disques, ne doit non plus donner naissance à aucun signe électrique, si notre explication est exacte, puisque les deux disques de platine sont toujours identiques; or, c'est précisément ce qui arrive contrairement à ce qui devrait avoir lieu, si le contact était la cause de l'électricité dégagée dans le cas où les deux disques sont l'un d'or et l'autre de platine. Si la quantité d'action chimique est bien faible, ne perdons pas de vue d'un autre côté, combien est infiniment petite la quantité d'électricité nécessaire pour charger le condensateur.

C'est à une cause du même genre, qu'on doit attribuer le développement d'électricité qui a lieu dans le contact du platine ou de l'or et des peroxydes tels que celui de plomb ou de manganèse. Il suffit, pour prouver que ce n'est pas un effet de contact, de placer entre le disque du condensateur et le peroxyde une lame de bois mince et encore suffisamment conductrice quoique desséchée; puis en touchant le peroxyde avec le doigt humide ou avec un morceau de papier trempé dans une solution alcaline ou acide, on charge le plateau du condensateur d'électricité positive. On le charge de négative en interposant entre lui et le peroxyde le papier humecté, et en le touchant avec le morceau de bois sec qu'on tient entre les doigts. Ainsi, dans l'action chimique qu'exerce le peroxyde de manganèse ou celui de plomb sur les corps humides, l'électricité positive reste dans le peroxyde d'où elle passe dans les corps solides et conducteurs en contact avec lui, tandis que la négative passe dans le corps humide. Les effets dynamiques auxquels donne naissance l'immersion dans l'eau pure, et encore mieux acidulée, d'un peroxyde et d'une lame de platine fixés respectivement aux deux extrémités d'un galvanomètre, sont tout à fait d'accord avec les faits que nous venons de décrire, ainsi que cela résulte, comme nous l'avons vu[1], des recherches que nous avons faites sur ce sujet, M. Becquerel et moi. M. Faraday est arrivé également à la même conclusion, en dé-

[1] Tome II, page 620.

montrant que les corps extrêmement chargés d'oxygène, tels que les peroxydes, exercent très-facilement des actions chimiques, surtout quand ils forment, comme dans les cas qui viennent de nous occuper, l'un des éléments d'un couple. Quant au platine, on sait que, lors même que la quantité d'oxygène condensée à sa surface est très-faible, il se conduit toujours, dans tous les phénomènes de cet ordre, comme un corps tout prêt à lâcher son oxygène [1].

Il nous paraît donc bien établi que dans le contact des deux corps solides, l'électricité développée n'est pas due au fait de ce contact, puisque, lorsqu'on réussit à éviter toute action chimique, ce qui est très-difficile, il est vrai, il n'y a aucun signe électrique, quand même toutes les conditions nécessaires pour qu'il y en ait, dans la théorie du contact, sont réunies. Il est clair qu'il faut aussi éviter les autres actions qui peuvent donner naissance à l'électricité, telles que les actions calorifiques et les actions mécaniques. En effet nous avons vu, en nous occupant de la thermo-électricité, que le contact d'un corps chaud et d'un corps froid produit un courant électrique; mais cet effet n'est nullement dû au contact qui n'est ici, comme dans l'électricité dégagée par les actions chimiques, qu'une manière de permettre à l'électricité développée par les changements moléculaires qui accompagnent la propagation de la chaleur, de se manifester. Il faut également éviter, dans le contact des corps, les actions mécaniques qui, en produisant elles-mêmes de l'électricité, peuvent donner lieu à des erreurs; c'est surtout quand on opère suivant le second mode indiqué par Volta, en mettant en contact des disques tenus par des manches isolants, que cette précaution est nécessaire, comme nous allons le voir en nous occupant de ce mode [2].

[1] Tome II, pages 352 et suivantes.

[2] Toutefois il faut aussi avoir égard à cette cause d'erreur, quand on opère suivant le premier mode, en tenant entre ses doigts le corps qu'on met en contact avec l'un des plateaux du condensateur. On sait en effet, qu'il suffit du plus léger frottement exercé sur ce corps par les doigts, surtout quand ils sont secs, pour dégager une quantité d'électricité assez considérable (voyez plus haut, page 545).

Digitized by Google

Le mode dont il s'agit consiste donc à mettre en contact plusieurs fois de suite un disque de zinc et un disque de cuivre isolés, en portant chaque fois l'un d'eux au condensateur, tandis qu'on décharge l'autre. Fechner a remarqué que, si l'un des deux disques, celui de zinc, par exemple, est fixé à un électroscope, et que l'autre, celui de cuivre, soit placé au-dessus comme le second plateau d'un condensateur, mais sans couche isolante, on obtient à l'électroscope une électricité positive très-sensible en enlevant le disque de cuivre, tandis que, lorsqu'ils sont en contact, il n'y a pas de signes électriques sensibles, lors même que le cuivre communique avec le sol. Pfaff et Péclet attribuent cet effet à ce que, les deux disques n'étant pas bien plans, ils ne sont en contact qu'en quelques points, et que partout ailleurs ils sont séparés par une couche d'air qui fait l'office de couche isolante, de sorte qu'on a une condensation. M. Péclet a observé plusieurs faits qui lui ont prouvé que les disques en contact peuvent se conduire comme des condensateurs à air; il a remarqué que s'ils sont bien plans, de sorte qu'on éprouve de la difficulté à les séparer, preuve qu'il n'y a point de couche d'air interposée, il n'y a point d'électricité développée, tandis qu'il y en a notablement si leurs surfaces sont usées à l'émeri et déformées de manière à n'être plus planes. MM. Fechner et Buff ne peuvent se ranger à l'explication de Pfaff et de Péclet; ils sont plutôt disposés à admettre au contraire que c'est surtout aux points de contact que l'accumulation et la condensation de l'électricité sont les plus considérables, Fechner ayant remarqué, contrairement à Péclet, que les électricités se condensent d'autant plus, que les deux faces sont plus polies. Mais ces divergences ont peu d'importance vis-à-vis du fait observé par M. Grove, savoir que l'expérience des deux disques réussit également bien, lors même qu'il n'y a aucun contact métallique entre les disques, ce qu'il obtient en plaçant entre eux un anneau mince en carton qui n'empêche pas qu'on les approche autant que possible l'un de l'autre, mais toujours en évitant le contact métallique. On a ainsi un véritable condensateur avec une lame d'air pour couche isolante; seulement on ne fait communiquer avec le sol

ni l'un ni l'autre des deux disques, ce qui fait qu'il faut plusieurs fois les rapprocher l'un de l'autre, pour pouvoir charger un véritable condensateur. Peu importe donc que les disques agissent comme condensateurs, ce que nous sommes pourtant disposés à croire, dans les expériences de Fechner et de Péclet; la cause du dégagement de l'électricité n'en est pas moins la même que dans les expériences faites avec des condensateurs dont les plateaux sont de deux métaux différents; nous n'avons donc pas besoin d'y revenir.

Mais, comme nous l'avons dit, il est important, dans ce mode d'opérer, d'éviter les actions mécaniques, et en particulier le frottement, qui peuvent donner lieu à de graves erreurs sur l'origine de l'électricité dégagée. C'est ce que M. Becquerel a fait voir, en répétant les expériences desquelles Davy avait cru pouvoir conclure que les métaux prennent l'électricité positive dans leur contact avec les acides, et l'électricité négative dans leur contact avec les alcalis, les acides et les alcalis prenant les électricités contraires à celles des métaux. Davy opérait avec des acides et des alcalis solides, tels que l'acide oxalique, l'acide succinique et l'acide boracique, la chaux sèche, la magnésie ou la strontiane; les métaux étaient du cuivre, du zinc, de l'étain tenus par des manches isolants. Ces faits, d'où Davy avait cru pouvoir tirer des conséquences importantes sur la nature de l'électricité inhérente aux acides et aux bases, étaient uniquement des effets de frottement, comme Becquerel l'a prouvé. Il a adapté à un électroscope bien sensible un condensateur formé de disques en platine; il n'a jamais obtenu aucun effet en plaçant sur l'un des plateaux du condensateur un morceau de chaux bien sèche tenu entre les doigts, et en touchant l'autre plateau également avec le doigt. Il a ensuite placé le morceau de chaux sur une planche de bois bien sec, puis il a posé dessus, avec précaution, sans exercer de frottement, un disque de cuivre tenu par un manche isolant; il l'a retiré, puis mis en contact avec l'un des plateaux du condensateur, touchant l'autre avec le doigt. En répétant un certain nombre de fois des contacts semblables, il n'a jamais obtenu de charge électrique; mais si, au lieu de poser

le disque de cuivre sur la chaux avec précaution, on le pose avec frottement, on parvient à charger le condensateur après un petit nombre de contacts; la charge entière est d'autant plus marquée que le frottement a été plus fort; la chaux prend l'électricité positive et le métal la négative. En substituant à la chaux l'un des acides mentionnés ci-dessus, on obtient également par le frottement et non par le simple contact, une charge d'électricité; dans ce cas le métal prend l'électricité positive et l'acide la négative. Il est donc bien démontré que les résultats obtenus par Davy sont dus à des effets électriques de frottement, et non à l'action électromotrice de Volta.

L'analyse que nous venons de faire des effets électriques qui se manifestent dans le contact de deux corps solides, confirme la conséquence que nous avions tirée de faits d'un tout autre ordre, savoir que, dans un couple voltaïque, l'origine de l'électricité n'est pas dans le contact des deux métaux qui forment le couple. Elle est donc dans l'action qui a lieu au contact du liquide et des métaux. Voici une expérience intéressante de Peltier, qui montre d'une manière évidente où est le siége de l'origine de l'électricité dans un couple.

On plonge dans deux vases séparés et bien isolés, remplis du même liquide, les extrémités d'un couple zinc et cuivre (fig. 327). On immerge d'abord le bout d'un fil de platine *d* dans

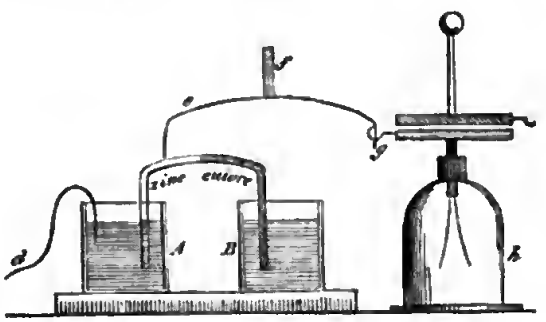


Fig. 327.

le vase A qui a reçu le zinc, et l'autre bout du fil communique au sol. Au moyen d'un autre fil de platine *e*, que l'on tient isolé par un manche de gomme laque *f*, on met successivement en communication le zinc, le cuivre et le liquide du vase B qui a reçu le cuivre, avec un des plateaux condensa-

teurs *g* d'un électromètre *h*. D'après cette disposition, le liquide ne peut posséder d'électricité libre, puisqu'il communique au sol, et le zinc ne devrait pas en posséder davantage, puisque la force électromotrice, suivant la théorie de Volta, est au contact du zinc et du cuivre. Ce n'est point ainsi que la distribution s'effectue; le liquide du vase A est neutre, mais le zinc, le cuivre et le liquide B sont négatifs au même degré. On place ensuite le bout *d* du fil de platine, communiquant au sol, dans le vase B, et l'on interroge de la même manière, au moyen du fil de platine isolé *e*, le cuivre, le zinc et le liquide du vase A, qui est alors isolé. Le liquide de B est nécessairement neutre, ainsi que le cuivre qui y est plongé, mais il en est de même du zinc, qui est également neutre; l'eau seule du vase A est positive. Cette expérience prouve donc que l'électricité n'est pas produite au contact des deux métaux, mais bien au contact entre le liquide acidulé A et la portion du zinc qui y est immergée.

Les partisans de la théorie du contact ont donc été amenés à établir, que c'est dans le contact des liquides et des solides que réside la principale source de l'électricité, mais sans reconnaître encore que l'action chimique qui a lieu entre le solide et le liquide fût la cause de l'électricité dégagée, admettant qu'elle en est simplement l'effet. De nombreuses expériences ont été faites sur la production de l'électricité qui a lieu dans le contact des solides et des liquides; nous avons déjà cité celles de Becquerel qui sont les plus anciennes, et celles de Karsten et de Buff. Nous rappellerons que celles de Becquerel consistaient à placer sur le plateau du condensateur une capsule métallique, qu'on remplissait de différents liquides dans lesquels on plongeait divers métaux tenus entre les doigts. Quand la capsule était de platine, quel que fût le métal employé et quelle que fût la dissolution acide ou alcaline, le liquide se chargeait toujours d'électricité positive qui, à travers la capsule de platine, allait charger le condensateur. Quand la capsule était de cuivre, elle prenait l'électricité positive si, la dissolution étant acide ou alcaline, les métaux plongés étaient le zinc ou le fer; elle prenait la négative si, dans les mêmes dissolutions, les métaux

immergés étaient le platine, l'or ou l'argent. Tous ces effets sont parfaitement d'accord avec la théorie chimique. Quant aux faits observés par M. Karsten, ils rentrent aussi dans la même théorie; mais nous ne nous arrêtons pas à ceux qui, du même genre que les résultats obtenus par Becquerel, ont déjà été également l'objet de notre examen; les autres ont été obtenus en combinant l'électricité produite par l'immersion de couples zinc et cuivre, dans des liquides plus ou moins acides, avec celle développée sur des condensateurs dont l'un des plateaux était de zinc et l'autre de cuivre. Il en résulte des effets plus ou moins complexes, dont l'explication se trouve facilement au moyen des principes que nous avons établis dans ce qui précède, et sur lesquels il est par conséquent inutile d'insister. Remarquons seulement que la force électromotrice ou polarisante qui naît du contact d'un métal, comme le zinc, avec de la simple vapeur d'eau, peut lutter avec celle qui naît du contact du même métal avec de l'eau pure, mais est inférieure à celle qui se manifeste quand l'eau est acide, alcaline ou salée. Ce principe important ne doit pas être perdu de vue quand on cherche à concilier, avec la théorie chimique, des faits tels que quelques-uns de ceux observés par Karsten, qui ont été souvent mis en avant comme contraires à cette théorie.

Parmi les physiciens qui se sont beaucoup occupés de l'électricité dégagée dans le contact des solides et des liquides, nous avons cité M. Péclet. Ce physicien opérait soit avec un condensateur ordinaire, soit, pour les cas où l'électricité était faible, avec son condensateur multiplicateur que nous avons décrit [1]. Il touchait le plateau supérieur avec le métal et recueillait l'électricité de l'inférieur, de sorte que l'électricité donnée par le métal était de signe contraire à celle qui était perçue. Pour avoir l'action du même liquide sur le métal, il prenait chaque métal entre ses doigts apres les avoir humectés successivement avec chacun des liquides. Voici un tableau qui renferme le résultat de ses expériences. Nous l'avons choisi parmi tous ceux qui ont été dressés sur ce même sujet, par divers physiciens, comme le plus exact et le plus complet.

[1] Tome I, page 104.

	ZINC.	MERCURE.	PLOMB.	ÉTAIN.	FER.	ANTIMOINE.	BISMUTH.	CUIVRE.	NICKEL.	ARGENT.	PLATINE.	OR.	CHARBON.	PEROXYDE DE MANGANÈSE.
Eau pure.	+26	+26	+17,5	+15	+11,5	+8,7	+7,3	+7,3	+10	»	»	»	»	—15
Acide sulfurique étendu. .	+27	+27	+14	+16	+13	+7	+4	+2,5	+3	»	—6	—4	—3	—20
Acide nitrique étendu. . .	+26	+21	+13	+12	+8	+1	+1	»	+0,5	—2	—4	—4	—3	—21
Acide chlorhydrique. . .	26	+20	+13	+12	+11	+5	+5	+5	+6	—3	—2	—0,3	—4	—21
Eau régale.	+27	+16	+15	»	+12	+6	+3	+3	+4	+2	—4	—4	—4	—19
Dissolution de potasse. .	+30	+28	+24	+28	+19,5	+21,3	+17	—11,5	+10	+3,5	+5	+5	+4	—7
Ammoniaque.	+38	+26	+22	+22	+13	+16	+10,5	+11,5	+8	+3,5	+4	+4	+3	—4
Sulfhydrate de potasse. .	+30	+35	+17,5	+24	+17,5	+20	+18	+22,5	+20	+22,5	+17	+17	+13	+5
Dissolution de sel marin.	+25	+22	+14	+15	+15	+7	+6	+6	+6	+2,5	»	—4	—2	—13
Alcool.	+26	+22	+13,5	+13,5	+6,5	+7	+4	+5	+3	»	»	»	»	—9,15
Huile d'olive.	+35	+12,5	+20	+0	+9	+10	+7,5	+7,5	+5	»	»	»	»	—10
Huile de naphte.	+24	+12,5	+13,5	+14,5	+10	+7,5	+9	+3,5	+4,5	»	»	»	»	—11

On voit, d'après ce tableau, qu'en général, sauf de rares exceptions, l'électricité perçue était toujours positive, ce qui indique que celle donnée par le métal au condensateur était négative, et que, par conséquent, ce métal était attaqué par le liquide dont les doigts étaient humectés. Le peroxyde de manganèse présente seul une exception, mais elle tient, comme nous l'avons dit, à ce que l'action chimique qui a lieu dans son contact avec les liquides est une désoxydation, et par conséquent doit produire une électricité contraire à celle qui résulte de l'oxydation[1]. L'argent, le platine, l'or et le charbon ont donné aussi, avec l'eau acidulée, des signes électriques contraires à ceux qu'aurait produits leur oxydation si elle avait eu lieu; ces signes sont, il est vrai, très-faibles, et il a fallu pour les percevoir le secours du condensateur multiplicateur. Ils sont évidemment le résultat de l'action qu'exerce sur les doigts eux-mêmes le liquide légèrement acide dont ils sont humectés, action qui n'est pas contre-balancée, dans le cas où les métaux sont peu ou point oxydables, par celle que ces métaux eux-mêmes éprouvent. L'électricité positive, prise par l'eau acidulée dans son action sur le doigt, se transmet, par l'intermédiaire du métal, au plateau supérieur du condensateur, et charge l'inférieur d'électricité négative, comme le montre l'expérience.

Les effets obtenus avec l'alcool, et surtout avec l'huile d'olive et l'huile de naphte, paraissent au premier moment surprenants, vu la nature de ces substances, mais il est évident qu'elles ne mouillent pas les doigts suffisamment pour former une couche isolante; sans cela, il n'y aurait pas de signes électriques, puisqu'il n'y aurait pas communication avec le sol; les huiles forment probablement avec la transpiration alcaline dont les doigts sont en général humectés, un composé qui

[1] Il n'y a qu'un cas où le peroxyde de manganèse transmette au plateau supérieur de l'électricité négative, et par conséquent de la positive à l'inférieur; c'est celui où il est en contact avec le sulfhydrate de potasse. Cela tient à la nature particulière de l'action chimique qui a lieu dans ce cas, action probablement assez compliquée, parce qu'il y a à la fois décomposition du peroxyde et du sulfhydrate.

est conducteur et qui agit sur les métaux; action qui est bien loin d'être nulle, ainsi qu'on s'en assure tous les jours en observant les rouages métalliques qui sont imprégnés d'huile.

Remarquons, en passant, que dans les effets électriques de contact on a eu tort de ne pas tenir en général assez compte, lorsqu'il s'agit surtout de signes électriques aussi faibles, de l'électricité qui résulte des actions chimiques exercées *sur* et *par* les doigts qui servent dans les expériences. Nous avons déjà remarqué le côté important que joue cette action dans le dégagement de l'électricité qu'on obtient en touchant un condensateur par un métal tenu entre les doigts; nous venons de voir dans les expériences de Péclet l'effet qui résulte de l'action sur les doigts de certains liquides. Nous verrons plus tard, en nous occupant de l'électricité animale, combien il est important d'avoir égard à cette cause de production de l'électricité, si l'on veut éviter de tomber dans de graves erreurs.

Nous avons dit que M. Buff avait fait aussi de nombreuses recherches sur l'électricité développée dans le contact des métaux et des liquides. Nous avons déjà parlé des effets de cette nature qu'il avait obtenus dans les expériences où il avait démontré que l'évaporation n'est pas elle-même une source d'électricité, mais qu'elle ne sert qu'à rendre plus perceptible par la faculté conductrice de la vapeur formée, l'électricité dégagée par l'action d'un liquide sur un métal. Comme Karsten, il avait remarqué qu'en recueillant l'électricité négative provenant d'un fil de zinc immergé dans le liquide avec un condensateur en zinc, il obtenait moins d'effet que lorsque le conducteur était en cuivre, ce qui tient, comme nous l'avons dit, à l'opposition des deux forces électromotrices exercées l'une par la solution sur le zinc qui y est immergé, et l'autre par l'air humide sur le plateau de zinc. En plaçant successivement sur des condensateurs faits de métaux divers, des liquides de différentes natures, il avait obtenu des résultats analogues à ceux de Becquerel et de Péclet, et il en avait tiré des conséquences tout à fait en opposition avec la loi de la série voltaïque des tensions électriques. Il avait été amené ainsi à lier la force électromotrice à l'affinité chimique du métal pour le radical du liquide composé

avec lequel il est en contact, et par conséquent à voir dans le développement de l'électricité voltaïque un phénomène chimique, et non un simple effet de contact.

En résumé, il nous paraît résulter des nombreuses recherches qui ont été faites sur la cause de l'électricité voltaïque, recherches dont nous n'avons pu donner qu'un extrait sommaire, que, pour que cette électricité soit développée aussi bien sous la forme statique que sous la forme dynamique, il faut qu'il y ait une relation chimique entre les corps en contact, relation telle que l'un d'eux puisse entrer en combinaison avec l'autre, ou du moins avec l'un des éléments de l'autre.

Il nous reste maintenant à démontrer que les piles sèches ne sont point une exception à ce principe, et que c'est bien l'action chimique et non le contact, comme on l'a prétendu, qui est l'origine de leur pouvoir électrique.

Nous avons déjà décrit sommairement les piles sèches [1]; nous ajoutons à ce que nous avons déjà dit sur ce sujet, que l'idée fondamentale des piles sèches reposait sur la théorie voltaïque de la pile. On espérait trouver, pour séparer les couples, un conducteur à la fois non liquide et non électromoteur, de telle façon que la pile aurait continuellement donné de l'électricité sans s'altérer sensiblement; c'était, disons-le franchement, chercher à réaliser l'idée du mouvement perpétuel, que d'espérer produire une force constante par un simple arrangement de substances sans dépense ou travail correspondant. Aussi les résultats ont été aussi pauvres que le principe était vicieux. On a eu des piles dont la puissance pouvait durer très-longtemps, tout en ayant pourtant un terme, mais était en même temps très-limitée, puisque ces piles ne donnaient que des effets de tension et étaient incapables de produire des courants, sauf dans quelques cas exceptionnels.

La première pile sèche fut construite par Behrens en 1805; elle se composait de 80 couples de zinc, cuivre et papier doré; Deluc, en 1810, fit plusieurs essais du même genre, et arriva à réunir 800 couples formés avec des disques mêmes de fer étamé

[1] Tome I, page 51.

et du papier doré; le fer-blanc et la dorure du papier formaient les deux métaux du couple, et le papier en était le conducteur humide. Cette pile faisait diverger fortement à ses pôles les feuilles d'un électroscope. Enfin Zamboni, en 1812, construisit la pile sèche suivant le mode qui a été généralement adopté, c'est-à-dire en la formant de la superposition d'un très-grand nombre de disques faits de papier, recouverts sur une de leurs faces d'une mince couche d'étain, et sur l'autre d'une couche de peroxyde de manganèse en poudre fine, fixée sur le papier par du miel ou de la colle d'amidon. Une pile formée de 2000 couples de cette espèce donne de petites étincelles, peut charger une bouteille de Leyde, etc. Avec des piles semblables, placées verticalement l'une à côté de l'autre, à une petite distance et de façon que leurs pôles opposés soient en regard, on peut imprimer un mouvement continu de va-et-vient à un petit pendule isolé qui oscille entre les deux pôles contraires. Toutes les piles sèches, avons-nous dit, perdent de leur puissance avec le temps; mais celles qui durent le plus longtemps, tout en étant moins fortes que celles de Zamboni, sont les piles construites avec des disques superposés, de faux papier d'argent et de faux papier d'or. Il faut coller ensemble, par la face où le papier est à nu, les disques d'espèces différentes, tellement qu'en les superposant on ait, par exemple, faux or, papier, faux argent, faux or, papier et ainsi de suite, en ayant soin d'observer toujours le même ordre. On attache les disques ensemble au moyen de cordons faits d'une soie bien pure, afin qu'elle soit bien isolante et bien imprégnée de verni; on peut aussi élever la pile entre des tiges de verre vernies, et la serrer au moyen de vis, en l'enfermant dans des tubes de verre vernis, dont le fond sur lequel repose le premier disque soit métallique, tandis que le dernier disque est pressé par une vis métallique, terminée extérieurement par une boule. La grandeur des disques influe sur la vitesse avec laquelle la pile se charge, mais est sans influence sur la tension de ses pôles. M. Riess, avec quatre piles de ce genre, de 2230 couples chacune de $2^{cc}\cdot 8$ de diamètre, obtenait en moyenne, en les plaçant les unes à côté des autres, de manière que leurs pôles con-

traires fussent en regard, 96 petites étincelles de $\frac{1}{8}$ de millim. de longueur, par minute. Quatre mois après qu'elles avaient été construites, elles ne donnaient plus que 48 étincelles dans une minute. Jäger et Singer, qui se sont beaucoup occupés des piles sèches, étaient parvenus non-seulement à produire par leur moyen de forts mouvements d'attraction et de répulsion ainsi que des étincelles, mais aussi à charger des bouteilles de Leyde; toutefois, ils n'avaient pas réussi à obtenir des décompositions chimiques ni des effets de déviation sur l'aiguille aimantée ou des contractions de la grenouille convenablement préparée. Cependant, Dubois-Reymond a obtenu ces deux derniers genres d'effet avec une pile de 1800 disques, semblable du reste à celles dont Riess s'est servi. Il fallait que la grenouille fût fraîchement préparée, et, quant au multiplicateur, il était de 24160 tours, et il n'accusait qu'une déviation de quelques degrés. Riess, de son côté, a décomposé de l'iodure de potassium, du sulfate de soude et du nitrate de baryte avec une vieille pile sèche de petite dimension.

M. Peltier, et plus tard M. Delezenne, ont obtenu facilement la décomposition de l'eau, au moyen des piles sèches, en donnant à leurs disques une grande surface, de manière à diminuer ainsi la résistance. M. Delezenne, en particulier, s'est servi de piles de 2000 couples, chaque couple étant un rectangle de 318 millim. de longueur sur 176 de largeur. Les couples de ces piles étaient de papier étamé d'un côté, et recouvert sur son autre face de peroxyde de manganèse délayé dans de la gélatine en fusion. Si le nombre des couples est trop considérable, on obtient des étincelles, mais on n'a ni effets calorifiques ni décompositions, d'après M. Peltier; cependant Delezenne a facilement décomposé l'eau avec des piles de 2600 et de 4000 couples. Le même physicien a fait un grand nombre d'expériences, pour démontrer la nécessité que le papier des disques ne soit pas trop sec; il les a humectés avec de l'eau salée, de manière à obtenir la présence du sel, qui, en maintenant leur humidité, augmentait leur pouvoir électrique, puis il a desséché fortement les piles en les plaçant dans des fours, ce qui au premier abord

augmentait leur puissance probablement à cause de la fusion de la colle de gélatine, mais ce qui la réduisait ensuite beaucoup, la colle étant redevenue solide par l'effet de l'absence de l'humidité. Enfin, il a vu que pour maintenir un pouvoir un peu considérable à la pile, il fallait renouveler de temps à autre la couche de peroxyde de manganèse qui, évidemment, se désoxydait, et il a aperçu que la face étamée s'oxydait légèrement.

Tous les observateurs sont d'accord à reconnaître que l'humidité est nécessaire pour conserver aux piles sèches leur activité. Une expérience d'Ermann, confirmée par Jäger et par Parrot, le prouve d'une manière évidente. Une pile sèche bien active, ayant été mise dans un vase dont on avait complétement desséché l'air par du chlorure de calcium, a entièrement perdu sa force dans quelques heures, et l'a reprise ensuite dans de l'air humide. Parrot a fait un grand nombre d'expériences dans lesquelles les piles sèches ont été rendues alternativement inactives ou actives, suivant qu'on les plaçait dans de l'air desséché ou humide. Toutefois, il ne faut pas conclure de ce que l'humidité est indispensable à la pile sèche pour produire son effet électrique, que c'est dans de l'air très-humide que cet effet est le plus fort, car il y a alors un défaut d'isolement qui nuit aux manifestations électriques.

Ajoutons que Jäger a construit des piles sèches en interposant entre les couches métalliques en contact des couches de résine ou de taffetas; mais ces piles ne sont qu'une série de condensateurs qui n'ont aucun rapport avec la pile proprement dite, et pour l'action desquelles il faut néanmoins toujours l'humidité de l'air.

Watkins est parvenu à construire encore une pile sèche avec un seul métal présentant, il est vrai, deux surfaces différentes. Elle est composée de 60 à 80 plaques de zinc de 4 pouces carrés de surface environ, décapées et polies sur une de leurs faces et non sur l'autre. Elles sont fixées dans une auge de bois, parallèlement entre elles à 1 millimètre seulement de distance les unes des autres, les faces polies étant tournées toutes du même côté. Les deux extrémités ou pôles de cette pile donnent

des signes électriques de tension très-prononcés, de nature à indiquer que la face polie joue le rôle de métal positif, et la dépolie celui de métal négatif. L'humidité de l'air favorise le développement de l'électricité dans cette pile, dans laquelle la couche mince d'air qui sépare les plaques joue, comme le papier dans les piles sèches ordinaires, le rôle de conducteur humide, ce qui est parfaitement d'accord avec la manière dont nous avons expliqué le dégagement de l'électricité dans les condensateurs dont l'un des plateaux est de zinc et l'autre de cuivre, ou de zinc recouvert d'une couche de vernis assez épaisse pour que l'air ne puisse pénétrer jusque sur sa surface.

Il n'est pas nécessaire d'insister longtemps, pour montrer que les piles sèches sont toutes également des appareils dans lesquels le développement de l'électricité est dû à une action chimique exercée par le papier, comme par l'air humide, sur les substances dont la réunion constitue les couples. Quant à la nature des effets qu'elles sont susceptibles de produire, elle dépend surtout de la résistance à la conductibilité très-considérable que ces piles présentent, plus encore que de leurs forces électromotrices qui sont passablement énergiques. Ces piles ont assez de rapports avec les piles à eau, telles que celle de Gassiott de 3520 couples, lesquelles ont beaucoup de tension, mais ne donnent pas des effets dynamiques très-considérables à cause de la grande résistance qu'elles présentent à la circulation du courant. Or, comme nous l'avons vu, Gassiott a très-bien établi la théorie chimique de sa pile à eau, et de même que la présence de l'humidité est nécessaire à la pile sèche pour être en activité, de même la présence de l'air, ou plutôt de l'oxygène, est indispensable à la pile à eau, parce que de même que l'air sec ne peut agir chimiquement sur la plupart des métaux, de même l'eau privée d'oxygène est également sans action; preuve, dans les deux cas également, de la nécessité d'une action chimique.

§ 8. Rapports entre l'électricité et les actions chimiques. — Théories électrochimiques.

Considérons une pile voltaïque dont le circuit fermé ren-

ferme un voltamètre; supposons que cette pile soit celle de la figure 310, construite de façon qu'on recueille l'hydrogène dégagé à chaque couple, et qu'on puisse évaluer la quantité de zinc oxydé. Deux ordres de phénomènes se présentent à nous dans ce circuit : une action chimique équivalente exercée partout où il y a un liquide conducteur et susceptible d'être décomposé, une production d'électricité qui se manifeste extérieurement par l'influence qu'exercent sur une aiguille aimantée toutes les parties du circuit. La disposition donnée aux diverses parties métalliques et liquides qui composent la pile, permet à la fois l'exercice de l'affinité et la production de l'électricité qui l'accompagne. Il est évident que l'origine de ces deux forces est dans la surface de contact des zincs et du liquide, et que l'action chimique équivalente qui a lieu dans le voltamètre n'est que le résultat de l'action à distance de l'affinité. En effet, une fois que toutes les parties du circuit, les solides aussi bien que les liquides, sont polarisées par l'action combinée de tous les zincs sur le liquide électrolytique qui les baigne, il faut, pour que la décharge ait lieu et que l'eau soit décomposée entre les métaux de chaque couple, qu'elle le soit aussi entre les deux électrodes de platine du voltamètre; autrement le circuit ne serait pas fermé. Mais il y a là une résistance à vaincre, puisque par eux-mêmes les deux électrodes sont sans action sur le liquide du voltamètre. Cette résistance est surmontée par la force électromotrice dont l'intensité dépend de la nature relative des liquides et des métaux des couples, et du nombre de ces couples. Il est vrai qu'elle varie aussi pour une même force électromotrice, avec la nature du métal dont sont faits les électrodes du voltamètre. Il est clair que si l'électrode positif est de zinc, le négatif restant de platine, non-seulement il n'y a plus de résistance, mais il y a un accroissement de la force électromotrice, puisqu'il y a un couple de plus. Si les électrodes sont tous les deux de zinc ou d'un même métal oxydable, il semble que la résistance doive être la même qu'avec les électrodes de platine, parce que les deux zincs tendent à polariser le liquide électrolytique dans des directions contraires, avec une même intensité, et que par conséquent leur effet, sous le rapport de la

facilité apportée à la décomposition du liquide, s'annule. Cependant les choses ne se passent pas ainsi, et cela tient à ce que l'oxygène qui se dégage à l'électrode positif, au lieu de former, comme sur le platine, une couche adhérente qui gêne le passage du courant et produit une polarité secondaire, se combine avec le métal de l'électrode en formant un oxyde qui se dissout. Quant à l'hydrogène qui se dégage à l'électrode négatif, il est en général également absorbé par la réduction de cet électrode qui est le plus souvent oxydé, ou par sa combinaison sous l'influence de l'électrode avec l'oxygène dissous. Toutefois, c'est surtout à l'électrode positif que se fait sentir l'avantage, pour la propagation du courant dans le circuit, de prendre pour cet électrode une substance capable de se combiner avec l'élément du liquide électrolytique qui s'y dégage, en formant avec lui un composé soluble dans ce liquide.

Il y a donc dans un circuit voltaïque, dont le voltamètre fait partie, décomposition de l'eau dans chacun des couples et dans le voltamètre. Ces deux ordres de décomposition sont également le résultat de l'affinité pour l'oxygène du métal positif du couple. Si cette affinité est très-forte, comme celle du potassium ou du sodium, un seul couple amalgamé de potassium et eau acidulée avec acide sulfurique suffit pour décomposer l'eau acidulée du couple et la même eau placée entre deux électrodes de platine; en effet, l'affinité ne peut, d'après l'arrangement du circuit, s'exercer qu'autant que le liquide du couple et celui du voltamètre sont décomposés tous les deux. Si elle est moins forte, comme c'est le cas, quand, au lieu de potassium, on a du zinc, alors il faut ajouter à celle qui est exercée par un couple celle d'un second ou d'un troisième pour décomposer le liquide du voltamètre. Si nous supposons donc, ce qui paraît probable d'après toutes les expériences, que dans un couple où il n'y a qu'un métal actif, la force électromotrice est proportionnelle à l'affinité de ce métal pour l'un des éléments du liquide électrolytique du couple[1], on aura dans le nombre

[1] Il ne faut pas oublier en effet que la force électromotrice d'une combinaison voltaïque est proportionnelle au nombre de couples qu'on forme avec cette combinaison.

des couples nécessaires pour vaincre une affinité donnée (celle de l'oxygène et de l'hydrogène d'une eau acidulée toujours au même degré), une expression assez exacte de la force d'affinité.

Il est à remarquer que la combinaison voltaïque doit toujours être de telle nature que, lorsque les deux métaux du couple sont réunis par un conducteur métallique, le liquide qui les sépare soit décomposé par l'affinité de l'un de ses éléments pour l'un des métaux; autrement on aurait beau en ajouter un nombre quelconque les uns aux autres, on n'obtiendrait jamais ni courant ni décomposition de l'eau dans le voltamètre. Il est important que le liquide dont est chargé le voltamètre soit toujours parfaitement le même; car s'il changeait de telle manière qu'il fût plus ou moins facile à décomposer, on comprend que la comparaison entre les différentes combinaisons voltaïques au point de vue de la force électromotrice, et par conséquent de l'affinité, serait impossible. Il est nécessaire aussi que, dans les couples eux-mêmes, l'un des métaux soit toujours inactif, car autrement les résultats deviendraient complexes. Ainsi, avec les couples cuivre et zinc dans l'acide sulfurique étendu, on aurait la mesure, non de l'affinité de l'oxygène pour le zinc, mais de la différence entre l'affinité de l'oxygène pour le zinc et celle de l'oxygène pour le cuivre. Avec des couples platine couverts de peroxyde de plomb et zinc dans l'acide sulfurique étendu, on aurait la mesure de la somme de l'affinité de l'oxygène pour le zinc et de l'hydrogène pour l'oxygène du peroxyde.

M. Cooke a essayé d'appliquer la méthode que nous venons d'exposer; seulement, il mesurait la force électromotrice de chaque combinaison voltaïque en plaçant dans le circuit dont elle faisait partie un tube rempli de sulfate de cuivre dont on pouvait allonger ou raccourcir la colonne liquide de manière à amener, au moyen de cette résistance variable, chaque combinaison à produire le même effet sur un galvanomètre placé dans le même circuit. La force électromotrice, et par conséquent l'affinité, était déduite de la comparaison des longueurs de la colonne liquide dans chaque cas, d'après les lois de Ohm. M. Cooke, en prenant diverses précautions pour tenir compte

de la polarisation de la lame de platine du couple, a obtenu les nombres suivants pour l'expression de la force relative d'affinité des divers métaux pour l'oxygène dans l'eau de pluie, en prenant pour unité la force électromotrice d'un couple zinc-cuivre dans la même eau de pluie, force qui représente la différence entre les affinités du zinc et du cuivre pour l'oxygène :

Zinc-cuivre.	= 1
Potassium.	= 3,13
Sodium.	= 2,91
Zinc.	= 2,23
Fer.	= 1.85
Étain.	= 1,75
Plomb.	= 1,70
Bismuth.	= 1,29
Antimoine.	= 1,29
Cuivre.	= 1,25
Argent.	= 0,83

M. Cooke a également trouvé, pour l'expression de l'affinité de l'oxygène pour l'hydrogène, le nombre 2,36; on peut être étonné que ce nombre soit supérieur à celui qui exprime l'affinité de l'oxygène pour le zinc, et que cependant le zinc décompose l'eau. Mais il faut remarquer que le zinc parfaitement pur ne décompose pas l'eau distillée privée d'oxygène, et que, par conséquent, le résultat de M. Cooke n'est point en opposition avec celui qui résulte de l'examen des réactions chimiques du zinc sur l'eau.

Nous ne saurions toutefois attacher encore une grande confiance aux nombres trouvés par M. Cooke, quoique l'ordre dans lequel les métaux sont rangés nous paraisse bien représenter leur degré d'affinité pour l'oxygène; tout en croyant vrai le principe sur lequel sa méthode est fondée, il y a encore bien des points à éclaircir et des données à déterminer avant de pouvoir en tirer des nombres qui expriment d'une manière un peu exacte les rapports d'affinité des différents corps les uns avec les autres.

L'un des plus essentiels parmi ces points, est de savoir dans

quelle condition il faut que s'exerce l'action chimique pour qu'il y ait production d'électricité. Quand on décompose l'eau par l'action du zinc, il s'opère deux phénomènes, l'un la décomposition même de l'eau, l'autre l'oxydation du zinc. Or, quelques physiciens, et M. Matteucci entre autres, prétendent que c'est dans le premier des phénomènes seulement qu'il y a dégagement d'électricité et non dans le second. Il rappelle que Davy n'a jamais pu obtenir le moindre signe d'électricité en faisant brûler du fer ou du charbon dans l'oxygène bien sec; il a lui-même constaté l'exactitude de ce résultat négatif, soit dans ses expériences sur l'électricité dégagée dans la combustion dont nous avons parlé dans le § 4, soit en brûlant du fer et du zinc dans l'oxygène, soit en combinant différents métaux avec le chlore gazeux. Il n'a obtenu dans aucun cas des effets électriques. Il a de plus trouvé qu'en faisant agir directement du chlore, du brome ou de l'iode sur le métal positif d'un couple, le zinc par exemple, plongé dans un liquide séparé par un diaphragme poreux du liquide où plonge le métal négatif, on n'augmente nullement la force du courant, quoique le zinc soit attaqué par le chlore, le brome ou l'iode. Il n'en est pas de même, comme on le sait, si le chlore, le brome ou l'iode se trouvent dans le liquide du métal négatif, parce qu'alors la décomposition de l'eau est facilitée. De même que la combinaison de deux éléments libres ne produit pas de signes électriques, de même la décomposition d'un composé binaire, sans qu'il y ait recombinaison de l'un de ses éléments, n'en produit pas non plus, suivant M. Matteucci. Ainsi, de l'oxyde de même que du bioxyde d'argent, du peroxyde de plomb et du chlorure d'or, projetés sur un creuset de platine fortement chauffé et en communication avec le condensateur, n'ont point produit d'électricité; ni l'élément resté dans le creuset, ni celui qui s'en échappait, ne se trouvaient électrisés. De ces faits et d'autres du même genre, M. Matteucci avait cru pouvoir conclure que la combinaison d'un corps simple métalloïde avec un métal ne produit point d'électricité, ni à l'état dynamique, ni à l'état statique; que, par conséquent, dans les couples de la pile, l'effet électrique tient à ce que le métalloïde faisait partie

d'une combinaison avant de se combiner avec l'un des métaux du couple.

M. Becquerel ne partage pas la manière de voir de M. Matteucci; il pense que les résultats, négatifs dans le cas de la combustion de divers corps, tiennent à ce que, le milieu ambiant étant isolant, les électricités produites dans l'action chimique ne peuvent s'y propager comme lorsque ce milieu est un liquide, et qu'alors elles se recombinent à mesure qu'elles sont développées, de sorte qu'elles ne sont pas perceptibles. Il a de plus montré qu'une dissolution iodurée ou chlorurée augmente l'intensité du courant d'un couple, aussi bien quand elle se trouve dans le compartiment où est le zinc du couple, que lorsqu'elle est placée dans celui où est le cuivre; les dissolutions essayées soit à l'état naturel, soit à l'état ioduré ou chloruré, étaient une dissolution de nitrate de potasse et une dissolution de potasse. Il ne nous paraît pas que ces dernières expériences invalident les conclusions de M. Matteucci, car rien ne nous prouve que l'iode ou le chlore des dissolutions agissent directement sur le zinc; il nous paraît plutôt probable qu'elles facilitent son oxydation en aidant la décomposition de l'eau des dissolutions.

Le point sur lequel M. Becquerel me semble avoir raison, c'est lorsqu'il affirme que la simple combinaison d'un oxyde et d'un acide produit de l'électricité, comme il l'a prouvé dans ses nombreuses expériences sur l'action mutuelle de deux dissolutions séparées l'une de l'autre par une membrane poreuse, et en particulier, dans son couple si remarquable potasse et acide nitrique. Nous savons, en effet, et nous avons prouvé qu'il ne faut pas aller chercher la cause de l'électricité développée, ailleurs que dans l'action chimique des deux dissolutions l'une sur l'autre; nous devons même ajouter que cette action contribue au dégagement de l'électricité dans la pile à deux liquides. Ainsi, il n'y a pas de doute que, lorsqu'on a un couple zinc sulfate de zinc et cuivre sulfate de cuivre, l'action mutuelle des deux sulfates, séparés l'un de l'autre par le diaphragme poreux, ne contribue à l'effet total. Si nous n'y avons pas eu égard, c'est que nous avons pris l'effet du couple dans son ensemble, et que d'ailleurs, l'électricité développée dans cette action est

faible, comparativement à celle qui résulte de l'oxydation du zinc par la décomposition de l'eau.

Admettant donc que la combinaison d'un oxyde avec un acide produise de l'électricité, nous ne voyons pas cependant dans ce fait une objection contre le principe de M. Matteucci. En effet, cette combinaison se fait peut-être d'une manière moins simple qu'on ne le pense ; quant à moi, je suis disposé à croire qu'elle est précédée ou accompagnée d'une décomposition. Nous savons en effet que, dans la décomposition des sels, l'élément qui va à l'électrode négatif n'est pas l'oxyde, mais le métal de l'oxyde, le sodium par exemple, s'il s'agit d'un sel de soude ; et que celui qui va à l'électrode positif n'est pas l'acide seul, mais un composé de l'acide et de l'oxygène de la base. Or, cela nous prouve que très-probablement, dans la combinaison d'un acide et d'une base, il y a une décomposition, peut-être de la base, peut-être de l'eau de la dissolution, dont l'oxygène se porte à l'acide pendant que son hydrogène s'empare de l'oxygène de la base dont le métal se combine avec l'acide oxygéné. Il doit se passer dans cette action un phénomène analogue à celui qui a lieu dans la formation des chlorures par l'action de l'acide hydrochlorique sur les oxydes, car il est bien évident que dans les décompositions électrolytiques tous les sels se conduisent comme des chlorures dans lesquels le chlore est remplacé par un *oxisulfion*, si l'acide est de l'acide sulfurique, ou des composés semblables s'il s'agit d'autres acides [1].

Ajoutons qu'à la suite de nouvelles recherches dans lesquelles, au moyen de ses appareils de dépolarisation dont nous avons parlé plus haut, il a pu se mettre à l'abri des causes d'erreurs provenant des polarités secondaires des métaux qui servent d'électrodes dans les dissolutions, M. Becquerel est parvenu à des résultats généraux sur l'électricité produite dans les actions chimiques, qui confirment ceux qu'il avait déjà obtenus et que nous avons déjà énoncés dans nos précédents paragraphes ; il s'accorde avec Matteucci sur le point que,

[1] Il est prouvé par l'exemple des cyanures que des corps composés peuvent jouer exactement le même rôle que le chlore, le brome ou l'iode.

dans la combinaison d'un métal avec l'oxygène, le chlore, l'iode et le brome sec, il n'y a pas production d'électricité, ce qu'il attribue à la non conductibilité de l'un des deux corps en présence; cependant, il admet que la combustion développe de l'électricité et que le corps combustible dégage de l'électricité négative, tandis que le comburant en dégage de la positive; cependant dans ce cas l'un des corps, le comburant, n'est pas conducteur. Enfin il observe que l'eau, dans sa combinaison avec les acides, se conduit comme une base, c'est-à-dire prend l'électricité négative, tandis qu'avec les bases elle se conduit comme un acide et prend l'électricité positive.

Au fond, la question qui nous occupe, de savoir dans quels cas l'action chimique développe de l'électricité, ne peut être résolue que lorsqu'on connaîtra mieux comment s'opère l'action chimique elle-même et quand on saura la mesurer; du reste, il est probable que les deux questions sont tellement liées, que l'une ne peut se résoudre qu'en même temps que l'autre. Un fait qui nous prouve l'ignorance où l'on est encore sur la manière même dont s'opèrent les actions chimiques, est celui qui est relatif à l'une des actions les plus simples, savoir celle de la simple oxydation des métaux dans l'air atmosphérique. D'après M. Bonsdorff, aucun métal ne s'oxyde dans de l'air parfaitement sec et privé d'acide carbonique, pas même le potassium et le sodium; il va jusqu'à affirmer que dans de l'air humide, mais bien privé d'acide carbonique, aucun des métaux connus ne s'oxyde non plus, sauf l'arsenic et le plomb. Quoi qu'il en soit, le premier de ces deux faits, qui nous paraît bien établi, montre donc que l'oxydation d'un métal dans l'air n'est pas le simple résultat de la combinaison directe de ce métal avec l'oxygène; il se passe là un phénomène plus complexe, savoir une action voltaïque, le métal décomposant l'eau par une action voltaïque locale, aidée par la présence de l'oxygène dissous qui agit sur l'hydrogène de cette eau; la présence de l'acide carbonique facilite l'action en rendant l'eau plus conductrice. Nous ne contestons pas qu'avec l'aide de la chaleur il ne puisse y avoir dans quelques cas combinaison directe de l'oxygène avec le métal, mais ces cas, qui sont exceptionnels, n'em-

pêchent pas que le plus souvent l'oxydation ne s'opère comme nous venons de l'exposer.

Un autre point important dans les phénomènes électro-chimiques sur lequel les physiciens ne sont pas d'accord, c'est de savoir si les corps composés peuvent propager l'électricité sans se décomposer, à la manière des corps simples élémentaires tels que les métaux. Nous avons déjà traité cette question soit à l'occasion des expériences sur lesquelles est fondée la loi des équivalents électro-chimiques [1], soit incidemment, en montrant que jamais on n'a pu observer de transmission d'un courant électrique à travers l'eau, sans que les électrodes soient polarisés, preuve que l'eau est décomposée; et nous avons eu l'occasion de donner une explication des nombreuses et ingénieuses expériences par lesquelles M. Foucault avait cru pouvoir établir cette conductibilité physique des liquides. Nous croyons donc que dans l'état actuel de la science, et en face des faits connus, on est obligé d'admettre que la propagation moléculaire de l'électricité dans les corps liquides ne peut se faire sans être accompagnée, dans les liquides composés, de la décomposition électrolytique. Nous ne contestons pas que la propagation ne puisse se faire dans un liquide, surtout s'il est mauvais conducteur, par une décharge entre les électrodes, analogue à celle qui constitue l'étincelle électrique ou l'arc voltaïque, et dans laquelle le liquide ne joue qu'un rôle passif, celui d'obstacle à l'établissement de cette décharge; il arrive souvent alors que le liquide lui-même est décomposé par la chaleur de l'étincelle; mais ce fait n'est nullement en opposition avec le principe que, lorsque la propagation a lieu moléculairement, il y a décomposition électrolytique du liquide.

Parmi les questions nombreuses qui sont encore à résoudre dans le sujet qui nous occupe, l'une des plus importantes serait de savoir quel est le rapport qui lie la force d'affinité avec l'effet électrique que l'action de cette force engendre. Quelques tentatives ont été faites à cet égard; nous y avons fait allusion dans le § 6; nous croyons devoir nous y arrêter encore

[1] Tome II, pages 359, 616 et 640.

un instant, quoique le résultat en soit bien incertain et bien limité, car il ne s'agit que de l'affinité de l'oxygène et de l'hydrogène. Nous avons déjà vu que Wheatstone et Pouillet étaient parvenus à comparer le courant qui résulte de la décomposition d'une certaine quantité d'eau, avec celui que produit un couple thermo-électrique d'une puissance donnée; mais leur résultat, quoique démontrant la grande supériorité du courant électro-chimique sur le courant thermo-électrique, ne donnait pas une idée de la quantité absolue d'électricité dégagée pour la production du premier. Faraday et Becquerel ont successivement essayé d'évaluer cette quantité.

Faraday a observé que le courant nécessaire pour décomposer un grain d'eau acidulée est suffisant pour maintenir à la chaleur rouge, pendant le même temps qu'il a employé à décomposer l'eau, savoir 3 minutes 45 secondes, un fil de platine de $\frac{1}{4}$ de millim. de diamètre. Or, il estime que la quantité d'électricité qu'il faudrait employer pour produire le même effet, serait celle fournie par 800,000 charges d'une batterie de bouteilles de Leyde, composée de 8 jarres de 8 pouces de hauteur et de 7 pouces 1/2 de diamètre, chargée avec trente tours du plateau d'une puissante machine électrique. Si telle est l'expression de la quantité d'électricité équivalente à celle qui est nécessaire pour décomposer un grain d'eau, cette expression est aussi celle de la quantité d'électricité que dégage la combinaison des quantités d'oxygène et d'hydrogène nécessaires pour produire un grain d'eau; quantité énorme comme on le voit.

M. Becquerel a trouvé, par une méthode toute différente, un résultat qui ne s'éloigne pas beaucoup de celui de Faraday. Il a d'abord déterminé la force du courant que développent les polarités secondaires engendrées sur des lames d'or, qui servent d'électrodes dans l'eau distillée à des décharges de bouteilles de Leyde; il a trouvé que, pour des décharges peu considérables, le courant, et par conséquent les polarités qui lui donnent naissance, sont proportionnelles à la distance explosive, et par conséquent à la quantité d'électricité qui passe dans l'eau où plongent les lames d'or. Puis, il a déterminé les polarités secondaires sur les mêmes lames d'or et dans l'eau distillée au

moyen d'un courant provenant d'un couple très-faible formé d'un amalgame de zinc placé dans un tube poreux, et d'un fil de platine plongé dans l'eau distillée. Il s'est assuré que les polarités acquises sont proportionnelles au temps pendant lequel le courant est transmis, pourvu que ce temps soit très-court. Ainsi, pour une durée de 1″, il a trouvé que les lames polarisées donnaient un courant de 10°73, et pour une durée de 0″,5, un courant de 5°,33, c'est-à-dire moitié moins fort. Pour comparer l'électricité de la décharge à celle du courant, il a commencé par déterminer avec soin l'intensité du courant dû aux polarités produites par les décharges, et il a trouvé que ce courant produisait au galvanomètre une déviation moyenne de 17°,97. Puis il a remplacé la décharge de la batterie par le courant du couple, et il a trouvé que ce courant, en passant pendant 1″, déterminait une polarité sur les lames, produisant 16°,50 de déviation. Partant du principe que les polarités ou les actions chimiques qui les ont produites sont proportionnelles aux quantités d'électricité en mouvement, il en a déduit que la quantité d'électricité formée dans 1″ par le couple est à celle de la décharge comme 16,50 : 17,97, ou comme 0,92 : 1. Maintenant, par une succession d'expériences délicates, M. Becquerel a réussi à déterminer à combien d'eau décomposée correspondait le courant du couple agissant pendant une 1″; il est parvenu ainsi à trouver que, pour décomposer 1 gramme d'eau, il faudrait une quantité d'électricité équivalente à celle que fournissent 51,586,400 décharges d'une batterie ayant 1 mètre carré de surface. Ce nombre se réduit à 20,063,456 quand la charge de la batterie est à son maximum. En ramenant aux mêmes conditions le résultat de Faraday, on trouve 21,850,451. La différence est peu considérable pour des expériences de cette nature. On peut donc conclure de là, en adoptant le nombre net de 20,000,000 pour 1 gramme, que, pour décomposer 1 milligramme d'eau, il faut 20,000 décharges d'une batterie présentant une surface de 1 mètre carré, ou la décharge d'un carreau électrique qui aurait environ 2 hectares de surface. Or, c'est cette même quantité d'électricité que doit produire la décomposition de ce même milligramme d'eau

opérée par un moyen chimique; et si elle était accumulée de manière à se décharger instantanément et non d'une manière successive au fur et à mesure de sa production, elle serait capable de produire les effets de la foudre. Il ne faut pas attacher une très-grande importance aux valeurs numériques obtenues par Faraday et Becquerel; mais leurs recherches donnent un résultat important confirmé par Peltier, savoir combien est minime la quantité d'action chimique nécessaire à la production d'une grande puissance électrique.

Mais de tous les rapports qui lient l'affinité chimique avec l'électricité qu'elle engendre, le plus important est celui qu'établit entre les deux formes de la même force la production de chaleur qui les accompagne. Nous avons déjà fait mention des recherches de M. Joule et de celles de M. Favre sur ce sujet, et j'ai également cité l'expérience par laquelle j'avais réussi à démontrer l'égalité qui existe entre la quantité de chaleur engendrée directement par l'action chimique et celle que produit le courant auquel cette même action chimique donne naissaoce [1]. Nous pouvons maintenant revenir avec plus de détails sur cet ordre de phénomènes que nous n'avions traités qu'incidemment, ne pouvant pas les approfondir avant de nous être occupé des actions électro-chimiques.

M. Joule, après avoir établi, comme nous l'avons vu, les lois du dégagement de la chaleur par le passage du courant électrique à travers les liquides, avait été conduit à admettre que la chaleur développée par les réactions chimiques sans électricité perçue, est la même que celle que produisent ces réactions sous forme de courant électrique, de telle façon que la chaleur serait due dans les deux cas à la résistance à la conductibilité électrique. Le savant physicien anglais a d'abord prouvé que les quantités de chaleur dégagées par la combustion des équivalents des corps, sont proportionnelles à leurs affinités pour l'oxygène gazeux; il parvient à ce résultat en cherchant la mesure de ces affinités dans l'action du courant électrique et en tenant compte des modifications apportées dans son intensité,

[1] Tome II, pages 191 et suivantes.

par l'état physique des éléments des combinaisons qui s'effectuent dans les couples d'où provient le courant. Il a déterminé pour le potassium, le zinc, le fer, le cuivre et l'hydrogène, la chaleur produite par la combustion directe de ces corps dans l'oxygène gazeux, d'après un procédé analogue à celui de Dulong, puis il évalue la chaleur produite par l'oxydation des mêmes substances dans la production du courant voltaïque; il trouve ainsi les nombres suivants comme expression des degrés[1], dont un équivalent de chaque corps élève par son oxydation la température d'une livre d'eau, dans le cas de la combustion directe et dans celui de l'oxydation avec électricité perçue :

	Oxydation directe.	Oxydation voltaïque.	Oxydation voltaïque corrigée.
Potassium. . .	17°,60	21°,17	»
Zinc.	11°,03	13°,83	11°,01
Fer.	9°,48	12°,36	8°,06
Cuivre. . . .	5°,18	9°,97	5°,97
Hydrogène. . .	8°,36	10°,47	10°,40

Pour obtenir les résultats corrigés contenus dans la troisième colonne, M. Joule remarque que dans l'oxydation par voie humide qui est accompagnée de la production d'un courant voltaïque, il y a trois forces, savoir : l'affinité de l'oxygène pour la base de l'oxyde, celle de l'oxyde pour l'acide sulfurique (en supposant que ce soit dans une dissolution d'acide sulfurique que l'oxydation ait lieu) et enfin celle de l'eau pour l'acide sulfurique; en éliminant les deux dernières forces qu'on peut évaluer directement, on trouve les nombres contenus dans la troisième colonne, qui sont très-rapprochés de ceux de la première, sauf pour le fer et pour l'hydrogène, ce qui tient à des causes faciles à apprécier.

M. Favre, comme nous l'avons déjà remarqué en nous occupant des effets calorifiques de l'électricité, a établi par des expériences nombreuses et exactes, la vérité du principe que j'avais énoncé en le fondant sur une seule expérience et auquel

[1] Les degrés sont Fahrenheit.

M. Joule était également parvenu par une autre méthode; savoir, que la chaleur confinée dans le liquide du couple et celle qui naît de la résistance du circuit métallique quel qu'il soit, sont toujours complémentaires l'une de l'autre. M. Favre a en outre démontré, ce que M. Joule n'avait fait qu'entrevoir, qu'on retrouve toujours dans le liquide du couple et dans l'arc interpolaire, la totalité de la chaleur que l'action chimique mise en jeu dans le couple serait seule capable de développer. Nous ne pouvons reproduire en détail les expériences de M. Favre; nous rappellerons seulement qu'elles ont été faites d'après la même méthode qui lui a servi à lui et à M. Silbermann, dans leur grand travail sur la mesure des quantités de chaleur dégagées dans les actions chimiques, et avec un calorimètre à mercure semblable, mais construit sur une plus grande échelle que le premier. M. Favre a d'abord mesuré la quantité de chaleur dégagée dans le couple quand le circuit était formé par un fil de cuivre assez épais pour qu'il n'y eût pas d'effet calorifique appréciable développé par suite de la résistance à la conductibilité; un fil de 2 millimètres de diamètre et de 3 décimètres de largeur au plus remplissait la condition voulue. Il a ensuite remplacé ce fil par des fils de platine de diamètres et de longueurs variables, susceptibles de se réchauffer plus ou moins; et en combinant son appareil de façon que la chaleur totale, aussi bien celle du fil que celle du couple, fût reçue par le calorimètre, il a obtenu avec ces fils variables, pour la mesure de la quantité totale de chaleur, des nombres très-peu différents les uns des autres et dont la moyenne est 18,124 unités de chaleur. Le nombre obtenu avec le fil de cuivre qui ne s'échauffait pas est 18,137; ce nombre représente la quantité de chaleur dégagée par l'action chimique correspondante au dégagement de 1 gr. d'hydrogène, ou à l'équivalent soit 33 gr. de zinc dissous, avec transmission d'électricité à travers un fil métallique qui n'offre aucune résistance au courant. D'après les expériences faites par M. Favre en commun avec M. Silbermann, le nombre qui exprime la chaleur dégagée par la formation du sulfate de zinc sans électricité transmise, est 18,444 qui, quoique légè-

rement plus fort, se rapproche cependant assez des deux autres pour permettre d'en conclure l'exactitude du principe que nous avons posé.

M. Favre remarque avec raison que la loi qu'il a établie permet de démontrer que ce n'est pas l'oxydation seule du métal qui développe le courant dans un couple voltaïque, mais que la dissolution de l'oxyde formé dans l'acide contribue aussi à cette production. En effet, si on admet que la quantité de chaleur qui est produite en vertu des actions chimiques dans un couple voltaïque zinc et platine plongé dans une dissolution d'acide sulfurique, est représentée par $A + B - D$, A étant la chaleur dégagée par la formation d'un équivalent d'oxyde de zinc anhydre, B la chaleur dégagée par la combinaison de cet oxyde avec l'acide sulfurique étendu, et D l'équivalent calorifique de l'eau, c'est-à-dire la chaleur absorbée par la décomposition d'un équivalent d'eau et par conséquent dégagée par sa formation; on aura, d'après les expériences directes de MM. Favre et Silbermann, $A = 42,451$, $B = 10,455$ et $D = 34,462$; d'où $A + B - D = 18,444$, nombre bien rapproché de 18,137, chaleur véritablement dégagée. Si on admet que cette chaleur n'est égale qu'à $A - D$, on a 7,989, nombre bien différent de 18,137. Il est donc bien évident que l'oxydation seule du zinc ne suffit pas pour rendre compte des effets engendrés par le courant.

C'est en partant des considérations du même genre que M. Favre cherche à expliquer pourquoi on ne peut pas décomposer l'eau dans un voltamètre quand on ne dispose que d'un seul couple zinc et platine plongé dans l'eau acidulée par l'acide sulfurique, tandis que cette décomposition peut avoir lieu avec un seul couple de Grove dans lequel le platine est entouré d'acide nitrique. Il remarque que la chaleur nécessaire pour constituer à l'état libre l'hydrogène dans le voltamètre, c'est-à-dire pour décomposer l'eau, ne se trouve pas dans les réactions chimiques qui ont lieu dans le premier couple, tandis qu'elle se trouve dans celles qui ont lieu dans le second. En effet, dans le premier couple cette quantité de chaleur est $A + B - D = 18,444$ unités, comme nous l'avons vu, tandis que la décomposition de

l'eau en absorbe 34,462. Dans le second couple il n'y a pas dégagement d'hydrogène; par conséquent il n'est pas nécessaire de retrancher D de A+B, ce qui fait que la chaleur dégagée devrait être de 52,906 unités; mais elle n'est en réalité que de 46,021, parce que la ségrégation chimique de l'oxygène de l'acide nitrique absorbe 6,885 unités de chaleur par équivalent, qui sont prises à la chaleur dégagée par la sulfatation du zinc et qu'il faut par conséquent retrancher de 52,906. Mais en tout cas 46,021 dépasse de beaucoup 34,462, nombre des unités de chaleur nécessaires à la décomposition de l'eau dans le voltamètre.

Comme on le voit, M. Favre part du principe que la chaleur voltaïque est uniquement un emprunt fait à la chaleur dégagée dans l'action chimique qui produit le courant, que, par conséquent, dans un circuit fermé la quantité totale de chaleur est constante pour une même quantité d'action chimique, et qu'en se distribuant de différentes manières, suivant la nature de ce circuit, elle éprouve un simple déplacement. Le savant physicien français est ainsi conduit à admettre un transport instantané de chaleur, à l'*état latent*, il est vrai, qui peut traverser un conducteur sans élever sa température, transport qui se fait de molécule à molécule dans l'eau placée dans le circuit, à mesure que les molécules successives sont décomposées et recomposées par l'échange qui se fait entre elles des éléments gazeux qui les constituent. Il estime qu'on peut ainsi se rendre mieux compte des effets qu'on observe dans les décompositions électro-chimiques, et par conséquent de la théorie de la pile; mais tout en étant porté à croire qu'on peut rattacher les effets produits par les courants de la pile à deux ordres de manifestation, dont les premières pourraient être considérées comme dues à des *courants de chaleur latente* et les secondes à des *courants d'affinité transmise*, il reconnaît qu'elles proviennent, ainsi que l'électricité elle-même, de la même source, c'est-à-dire de l'action chimique.

Tout en admettant avec M. Favre la liaison intime qui existe entre les quantités de chaleur dégagées dans les différentes parties d'un circuit, nous ne pouvons les considérer

comme de simples déplacements de celle qui est produite dans le couple; nous sommes plutôt disposés à les attribuer à la distribution variable avec la nature du circuit, de la force qui naît de l'exercice de l'affinité dans le couple. Mais, avant de développer notre pensée, nous devons, pour compléter l'exposition du sujet qui nous occupe, dire quelques mots des recherches plus récentes de M. J. Regnauld, qui nous paraît se ranger à l'opinion de M. Favre.

M. J. Regnauld, partant d'une expérience par laquelle M. Favre trouve que la chaleur dégagée par l'oxydation de l'équivalent de zinc amalgamé est supérieure de 352 unités à celle qui est dégagée par l'oxydation de l'équivalent de zinc pur, en conclut que cette différence est due à ce que dans l'amalgame, le zinc étant liquide, il n'est pas obligé, comme lorsqu'il est solide, d'absorber de la chaleur dans sa transformation en sulfate, absorption qui diminue d'autant celle que produit la combinaison chimique. Les 352 unités représentent donc la quantité de chaleur devenue latente dans le zinc amalgamé et qui se retrouve sous forme d'électricité dans l'excès de force électromotrice que présente le zinc amalgamé sur le zinc pur. Cette transformation de la chaleur en force électromotrice ne nous semble point nécessaire pour expliquer l'influence de l'amalgamation, qui nous paraît tenir simplement à ce que l'affinité s'exerce plus facilement entre l'eau acidulée et le zinc quand ce dernier est dissous, puisqu'elle n'a plus la cohésion à vaincre; phénomène semblable à celui que présentent la plupart des actions chimiques. La même cause, c'est-à-dire l'exercice plus facile de l'affinité, nous paraît expliquer également le plus grand développement de chaleur qui accompagne l'oxydation du zinc quand, au lieu d'être pur, il est amalgamé.

Nous ne contestons point du reste que la chaleur dégagée et la force électromotrice ne marchent ensemble, sans être toutefois la cause l'une de l'autre, puisqu'elles nous paraissent également dépendre, quant à leur intensité, de celle de l'affinité qui leur donne naissance à toutes deux. M. J. Regnauld fait remarquer en effet que le rapport entre les chaleurs dégagées dans un couple de Grove et un couple de Daniell est le même

que celui des forces électromotrices de ces deux couples, c'est-à-dire égal à 1,731 environ. Déjà auparavant M. Wood, à la suite d'expériences sur la chaleur dégagée par l'oxydation dans l'eau de différents métaux, avait trouvé que l'ordre de ces métaux, classés d'après la quantité de chaleur à laquelle leur oxydation donne naissance, est exactement le même que celui que fournit la comparaison des forces électromotrices qui naissent de leur combinaison avec l'oxygène. Toutefois, la question qui nous occupe exigerait encore beaucoup de recherches pour pouvoir être complétement résolue.

Quoi qu'il en soit, il nous paraît bien démontré qu'il y a un rapport intime entre l'affinité chimique d'une part et la chaleur ainsi que l'électricité qu'elle dégage d'autre part, et que c'est dans la détermination des quantités de chaleur développées et des forces électromotrices engendrées, qu'on pourra trouver la mesure la plus exacte des affinités. Ce n'est que lorsqu'un semblable travail aura été achevé qu'il sera possible d'asseoir sur des bases un peu solides une théorie électro-chimique. Cependant j'essayerai dès à présent d'énoncer brièvement sur ce point quelques idées qui me paraissent s'accorder mieux avec les faits actuellement constatés que les hypothèses dont on s'est contenté jusqu'ici, tout en reconnaissant qu'il est impossible, dans l'état actuel de la science, de donner une théorie complétement satisfaisante.

Nous avons déjà rappelé les deux théories électro-chimiques qui ont été proposées, l'une par Berzélius, l'autre par Ampère [1]; la première, basée sur l'hypothèse que les atomes ont tous deux pôles électriques de nature contraire; la seconde, sur l'hypothèse que les atomes ont tous une électricité naturelle, les uns positive, les autres négative. Nous avons observé que la seconde théorie a le grave inconvénient de partager les corps en deux catégories distinctes, les uns électropositifs, les autres électronégatifs, tandis qu'il est évident que leur propriété électrique n'a rien d'absolu, puisque le même corps joue tantôt le rôle d'électropositif, tantôt celui d'électronégatif, suivant le

[1] Tome I, page 669.

corps avec lequel il est combiné. Cette objection est pour nous une objection de principe à laquelle il est impossible de répondre, malgré les artifices ingénieux au moyen desquels on a cherché à la réfuter. La première théorie, celle de Berzélius, nous paraît présenter des objections moins dans son principe que dans la manière dont son auteur l'envisage dans ses détails et en fait l'application; nous avons déjà démontré tout ce que présente d'improbable l'hypothèse de Berzélius, que les atomes, tout en ayant deux pôles électriques, deviennent unipolaires dès qu'ils se combinent, c'est-à-dire qu'ils ne gardent qu'une de leurs électricités en se combinant, et qu'ils abandonnent l'autre. Nous allons du reste voir que cette hypothèse n'est point nécessaire pour expliquer les phénomènes électro-chimiques, lesquels peuvent très-bien se concilier avec l'existence d'une polarité permanente des atomes. Nous avons déjà cherché à expliquer, au moyen de cette polarité, les phénomènes magnétiques et diamagnétiques; nous allons maintenant essayer de montrer qu'elle rend bien compte aussi des phénomènes électro-chimiques.

Le principe dont nous partons c'est que tout atome a deux pôles électriques contraires, mais de même force; est-ce à un mouvement de rotation sur lui-même ou à une autre cause qu'il doit cette polarité? peu importe, c'est pour nous un fait primitif. Un atome diffère d'un autre atome, quant à sa polarité, uniquement en ce que l'un a une polarité plus forte que l'autre; mais dans le même atome les deux pôles électriques sont toujours de même force. Quand deux atomes isolés sont rapprochés l'un de l'autre, ils s'attirent par leurs pôles opposés; mais, comme ils sont sphériques, ils ne peuvent venir en contact que par un des pôles du premier et par le pôle contraire du second. Sera-ce indifféremment le pôle positif ou le pôle négatif du premier qui viendra en contact avec le pôle négatif ou le pôle positif du second? Nous sommes obligé d'admettre un principe qui nous paraît pouvoir se fonder sur l'observation d'un grand nombre de faits, savoir, que lorsque les deux atomes sont libres et isolés, c'est toujours le pôle positif de celui qui a la polarité la plus forte qui s'unit avec le pôle négatif de celui qui a la polarité la plus faible. S'ils ont la même force de polarité, il n'y

a pas de raison pour qu'ils s'unissent par deux de leurs pôles contraires plutôt que par les deux autres. Alors ils ne s'attirent point par leurs pôles, mais ils obéissent seulement à l'*attraction moléculaire* due à l'effet de leur masse; c'est le cas des atomes homogènes dont l'attraction constitue la cohésion; tandis que lorsque les atomes sont hétérogènes, ils s'attirent par leurs pôles opposés, ils obéissent alors à l'*affinité chimique*.

L'affinité chimique est donc le résultat de l'attraction de deux atomes différents par leurs pôles contraires, mais s'exerçant de telle façon que le pôle positif du plus fortement polaire s'unisse avec le négatif de celui qui l'est moins fortement. L'atome composé qui résulte de l'union des deux atomes élémentaires a également deux pôles, savoir, le négatif de l'atome le plus fort et le positif du plus faible; ces deux pôles sont égaux, parce que l'excès du plus fort sur le plus faible de ceux qui se sont unis sert à neutraliser une partie correspondante de l'électricité du pôle libre du plus fort; l'atome composé se trouve donc dans les mêmes conditions que l'atome libre, et jouit des mêmes propriétés. Ainsi, en supposant que l'oxygène soit celle des substances simples qui ait la polarité la plus forte, un atome d'oxygène s'unira avec un de soufre, de façon que son pôle positif soit adhérent au négatif du soufre; il en sera de même de l'union d'un atome d'oxygène avec deux atomes d'hydrogène. Un atome de chlore s'unira avec l'hydrogène de la même manière que l'oxygène, tandis qu'il s'unira avec un atome d'oxygène de telle façon que ce sera le pôle positif de l'oxygène qui sera uni au pôle négatif du chlore; ainsi, ce sera par son pôle positif que le chlore s'unira avec l'hydrogène et par son négatif qu'il s'unira avec l'oxygène.

Un atome composé quand il est isolé a donc, comme l'atome simple, deux pôles contraires et égaux; les électricités de ces deux pôles se réunissent par la surface même de cet atome de la même manière que nous avons admis que cela avait lieu pour l'atome simple [1]. Mais, si l'on place l'atome composé entre deux polarités contraires, entre les deux pôles d'une pile par

[1] Voyez tome I, page 570, figure 172.

exemple, aussitôt cet atome se dispose de façon que son pôle + soit tourné du côté du pôle négatif de la pile et son — du côté du pôle positif de la même pile ; c'est donc quand il s'agit de l'eau, les atomes d'hydrogène qui sont tournés avec leur pôle positif du côté du pôle négatif de la pile et les atomes d'oxygène du côté du pôle positif. La polarisation des molécules des liquides électrolytiques, qui précède toujours leur décomposition, est donc une conséquence de leur polarité naturelle. Maintenant, si la puissance électrique est suffisante, l'électricité positive de l'électrode positif attire la négative libre de la première molécule d'eau, et détermine ainsi la séparation de l'oxygène qui abandonne son hydrogène à l'oxygène de la molécule d'eau suivante, et ainsi de suite. La différence entre l'état naturel d'un liquide et son état de polarisation électrique consiste donc en ce que dans le premier état les molécules laissées à elles-mêmes sont dans un équilibre électrique complet, les électricités égales et contraires dont leurs deux pôles sont doués se réunissant par leur surface; tandis que dans le second état l'équilibre électrique est rompu, les électricités contraires ne se réunissant plus par la surface des molécules dont les pôles positifs sont tous tournés du côté du négatif de la pile et les négatifs du côté du positif de la pile. Cet état de polarisation est suivi de l'électrolyse, c'est-à-dire de la séparation des atomes constituants de chaque particule et de leur combinaison avec les atomes contraires des particules suivantes ou précédentes, sauf pour ceux des particules extrêmes, lesquels se dégagent à la surface des électrodes. Remarquons seulement qu'au moment où les atomes d'oxygène et d'hydrogène de deux particules consécutives deviennent libres, ils doivent se retourner pour que ce soit le pôle + de l'oxygène qui se combine avec le pôle — de l'hydrogène et non le pôle + de l'hydrogène avec le — de l'oxygène, puis ce retournement et la combinaison une fois opérés, la polarisation recommence [1].

Toutes les décompositions électrolytiques s'expliquent de la même manière. Nous n'en donnerons que quelques exemples.

[1] Voyez, pour la nécessité de ce retournement, à la page 291, tome II.

Ainsi les molécules d'une dissolution d'acide sulfurique peuvent être considérées comme formées d'une molécule d'acide sulfurique dont le pôle + a attiré le pôle — de la molécule d'eau unie avec celle de l'acide ; mais le pôle + de la molécule d'acide sulfurique appartient au soufre, le pôle — de la molécule d'eau appartient à l'oxygène, de sorte que lorsque les molécules de la dissolution sont décomposées après avoir été polarisées, il n'est pas étonnant que l'atome d'oxygène marche avec la molécule d'acide sulfurique en se séparant des atomes d'hydrogène, et en formant ce que nous avons appelé un *oxysulfion*. Il en sera de même quand l'hydrogène est remplacé par une base métallique, telle que le sodium ou le cuivre, avec la différence qu'à l'électrode négatif le sodium décompose l'eau, tandis que le cuivre s'y dépose à l'état métallique. Le mode de décomposition électrolytique des composés non binaires doit dépendre de la manière dont la combinaison s'opère entre les divers atomes qui entrent dans leur formation, et par conséquent du degré d'affinité ou de polarité électrique relative de ces divers atomes. C'est donc en étudiant les phénomènes qui accompagnent la combinaison et en particulier en mesurant la force électromotrice et la chaleur qui s'y développent, qu'on pourra se rendre compte de la manière dont ces divers atomes se groupent et se séparent dans la décomposition. Quant aux composés binaires, leur décomposition s'explique facilement de la même manière que celle de l'eau ; ainsi dans celle de l'acide hydrochlorique, le chlore se conduit comme l'oxygène lorsqu'il s'agit de l'eau ; il en est de même des autres chlorures, des sulfures, des cyanures, comme des oxydes. Dans la décomposition des acides chloriques, sulfuriques, etc., le chlore, le soufre, etc., se conduisent alors non plus comme l'oxygène, mais comme l'hydrogène. Tous ces résultats sont les conséquences évidentes de notre théorie.

La formation des composés est au premier abord plus difficile à expliquer dans cette théorie que leur décomposition, non pas dans le cas des composés binaires dont les deux éléments étant libres, se combinent suivant le mode que nous avons décrit plus haut, mais dans le cas où la formation d'un com-

posé n'a lieu qu'au moyen de la décomposition d'un autre. Cependant alors nous estimons que la même théorie peut rendre compte d'une manière satisfaisante de ce qui se passe.

Supposons, pour fixer nos idées, une lame de zinc plongée dans une dissolution d'acide sulfurique; le premier effet de la présence du métal dans le liquide, doit être de détruire l'équilibre électrique des particules de la dissolution en contact avec lui [1]; dès lors l'électricité négative de l'oxygène et la positive de l'hydrogène de chacune de ces particules deviennent libres, mais comme la première est beaucoup plus forte que la se-

[1] Le contact d'un corps conducteur doit en effet empêcher la recomposition des électricités libres des atomes combinés, qui avait lieu par la surface extérieure de ces atomes; il en résulte que l'atome d'oxygène qui est combiné se trouve ainsi avoir son électricité négative entièrement libre, tandis qu'une partie de sa positive est dissimulée par l'atome d'hydrogène; voilà pourquoi il vient adhérer au métal par son pôle négatif. Il est probable que la propriété catalytique du platine et de quelques autres substances tient à la même cause. Quand des molécules d'oxygène et d'hydrogène sont en contact bien intime avec du platine, les électricités de leurs pôles respectifs cessent de se recomposer par la surface même des atomes; les atomes d'oxygène adhèrent alors par leurs pôles positifs avec la surface du platine; ceux d'hydrogène y adhèrent par leurs pôles négatifs; et alors les pôles libres des atomes d'oxygène et d'hydrogène s'attirent, étant de nature contraire; il en résulte la combinaison des atomes de ces deux gaz, accompagnée d'une petite décharge électrique à travers le platine et d'un dégagement de chaleur. L'électricité qui traverse le platine ne peut être perçue directement à cause de la distance infiniment petite des atomes dont les électricités sont ainsi combinées. L'adhésion des gaz à la surface des métaux tient probablement en grande partie en effet à leur polarité électrique; c'est un phénomène analogue à celui de la polarisation qu'exerce sur les molécules d'un liquide une lame métallique qu'on y plonge. On conçoit donc pourquoi, soit pour obtenir une forte adhésion, soit pour produire l'effet catalytique, il faut que la surface métallique soit très-propre et que, si elle est très-divisée, sa puissance en est augmentée. On conçoit également pourquoi il ne faut pas que cette surface puisse elle-même se combiner fortement avec l'oxygène, puisqu'alors celui-ci ne pourrait plus se combiner avec l'hydrogène; nous disons *fortement*, parce que l'adhésion de l'oxygène au platine, par exemple, est bien une combinaison chimique, puisqu'elle est le résultat de la polarité électrique et non pas de la simple attraction moléculaire; et nous avons une preuve expérimentale que c'est une combinaison dans le fait de la désagrégation de la surface du platine qui a servi pendant un certain temps à déterminer la combinaison de l'oxygène et de l'hydrogène, par l'effet de son pouvoir catalytique.

conde, puisque l'oxygène est beaucoup plus fortement polaire que l'hydrogène, c'est elle qui agit sur le métal en attirant le pôle + de sa particule et en la polarisant ainsi ; à son tour l'électricité positive libre de l'hydrogène de la particule d'eau, agit sur la molécule suivante de la dissolution et la polarise en détruisant aussi son équilibre électrique, de façon que son oxygène négatif soit tourné du côté de la particule en contact avec le zinc et ainsi de suite. C'est ainsi que s'établit cet état polaire que nous avons admis être le premier effet du contact d'un métal avec le liquide électrolytique, et qui doit avoir lieu avec tout corps conducteur de l'électricité, lors même qu'il n'est pas suivi de l'action chimique qui donne naissance à un nouveau composé. Quant à cette action chimique, qui consiste dans la décomposition du liquide et la combinaison de l'un de ses éléments avec le métal, elle n'a lieu, en général, comme nous l'avons vu, que lorsque la chaîne électrique peut être formée, soit par l'effet d'un défaut d'homogénéité dans la surface métallique elle-même, soit par l'effet de son contact avec une autre substance constituant avec elle un couple voltaïque. Toutefois, il se peut qu'avec certains corps, tels que ceux dont l'état polaire diffère beaucoup de celui de l'oxygène (métaux très-oxydables), l'action chimique qui suit l'établissement de l'état polaire, puisse avoir lieu sans que le circuit soit formé, comme aussi avec les métaux très-peu oxydables, elle n'a pas lieu lors même qu'il est formé. On conçoit que l'explication que nous venons de donner s'applique facilement à tous les cas analogues à celui que nous avons pris pour exemple, à ceux en particulier où la dissolution est un chlorure, un sulfure, un cyanure, et non pas seulement une combinaison d'oxygène, et où les composés formés sont par conséquent également des chlorures, des sulfures, des cyanures, etc.

Ainsi toutes les actions chimiques du genre de celles dont nous venons de parler, sont des actions électro-chimiques tout à fait semblables, sauf qu'elles sont locales, à celles qui ont lieu dans un couple voltaïque. Il n'est donc pas étonnant que la quantité de chaleur qui accompagne leur exercice soit exactement la même, que cet exercice ait lieu dans l'une ou

l'autre des deux formes, quand la quantité et la nature de l'action chimique sont les mêmes [1].

Revenant à l'action chimique qu'exercent mutuellement l'un sur l'autre deux corps simples qui ne font partie ni l'un ni l'autre d'aucune combinaison, il faut, pour qu'elle s'opère, que le rapprochement entre les atomes soit assez grand pour que le pôle + du plus fortement polarisé attire le pôle — de celui qui l'est le moins. La chaleur, en exaltant la polarité, peut faciliter la combinaison. Dans le cas où l'un des corps simples est l'oxygène, on conçoit que son ozonisation, qui paraît consister à désagréger les molécules, donne aux atomes, en les isolant, toute leur polarité et augmente ainsi la puissance oxydante de ce gaz. On sait également que l'action oxydante est beaucoup facilitée par la présence de la vapeur aqueuse; ce fait, qui est constant, tient évidemment à ce que le phénomène devient alors électro-chimique; la vapeur d'eau est polarisée par le métal comme l'eau elle-même, et l'affinité de l'oxygène pour l'hydrogène des particules aqueuses favorise leur électrolysation, et par conséquent l'oxydation du métal, qui a lieu aux dépens de l'oxygène de ces particules, tandis que l'oxygène gazeux reforme de l'eau avec leur hydrogène.

Il n'y a aucun doute que toute action chimique qui n'est pas une simple combinaison de deux éléments isolés, mais dans laquelle il y a à la fois décomposition et production d'un nou-

[1] En parlant des essais de Faraday et de Becquerel pour déterminer la quantité d'électricité qui est dégagée dans une certaine action chimique, telle que l'oxydation du zinc, nous avons dit que Peltier était parvenu, de son côté, par un procédé tout différent, à montrer combien est prodigieuse la quantité d'électricité qui se développe par l'effet de l'action chimique la plus faible. Quoique les résultats de M. Peltier ne soient pas parfaitement d'accord avec ceux des deux savants physiciens que nous avons nommés, ils n'en confirment pas moins l'exactitude du principe qu'ils ont établi. Il suffit, en effet, d'après M. Peltier, de l'oxydation de *cent cinquante et un billionièmes* de milligramme de zinc ($0^{ms},0000000151$) pour produire une électricité *dynamique* capable de faire dévier de 1° l'aiguille d'un galvanomètre sensible, et de l'oxydation du *dixième de deux mille cent trente-six quatrillionièmes* de milligramme de zinc ($0^{ms},00000000000002136$), pour produire une électricité *statique* capable de faire diverger de 1° l'aiguille de l'électromètre de M. Peltier.

veau composé, ne soit, comme nous l'avons déjà remarqué, un phénomène très-complexe, et que les atomes des corps ne se groupent d'une manière très-différente de celle dont ils étaient groupés avant l'action. Ces changements dans leur mode de groupement ne peuvent pas s'opérer sans qu'il y ait une grande perturbation dans leur mouvement, ce qui amène l'élévation de température dont la production de l'action chimique est toujours accompagnée. Or, cette élévation est d'autant plus forte que l'affinité qui détermine l'action chimique est plus énergique, et que par conséquent la perturbation est plus grande. Le rapport si intime qui unit la quantité de chaleur produite avec l'affinité d'une part, et l'affinité avec la force électromotrice d'autre part, est bien favorable à l'hypothèse par laquelle, attribuant l'affinité à la polarité électrique naturelle des atomes, nous faisons dépendre la polarité d'un mouvement de rotation des atomes sur eux-mêmes. En effet, dans la théorie mécanique de la chaleur, la température doit dépendre de la rapidité de ce mouvement de rotation, qui elle-même doit influer sur l'énergie de la polarité électrique.

Nous ne nous étendrons pas pour le moment davantage sur ce sujet tout théorique, vu que nous manquons encore dans l'état actuel de la science de faits en nombre suffisant pour justifier ou infirmer notre hypothèse. Nous ne nous dissimulerons pas les objections qu'on peut lui opposer, savoir, en particulier, la difficulté de concevoir qu'une simple différence dans la polarité électrique des atomes puisse expliquer l'affinité; la nécessité d'admettre dans cette hypothèse que c'est toujours le pôle positif de l'atome dont la polarité est la plus forte qui attire le négatif de celui dont la polarité est la plus faible, et jamais le négatif du premier qui attire le positif du second, du moins quand ils sont libres et non combinés; enfin, si la rotation des atomes sur eux-mêmes est la cause de leur polarité, et en même temps celle de leur température, comment peut-il se faire que des atomes différents, ayant par conséquent une polarité différente, soit un mouvement de rotation différent, puissent avoir la même température?

Tout en reconnaissant la force des objections que nous venons

de présenter, nous pouvons cependant y répondre en partie. D'abord il nous paraît que la polarité de l'atome est un des principes les mieux établis par l'ensemble des faits qui constituent la science de l'électricité; les phénomènes de l'induction électro-dynamique et électrostatique, ceux de la thermo-électricité, soit dans les corps isolants, soit dans les corps conducteurs, les faits relatifs au dégagement de l'électricité par frottement, sont presque impossibles à expliquer si l'on n'admet pas ce principe. Et le principe une fois admis, on ne peut concevoir d'autre différence entre deux atomes sous ce rapport, sinon que l'un a une polarité électrique plus forte que l'autre. Dès lors la liaison si intime qui existe entre l'affinité chimique et l'électricité, conduit nécessairement à faire jouer dans l'exercice de la première un rôle à la polarité de l'atome. On conçoit toutefois que cette polarité, et par conséquent l'action qu'elle exerce, puisse être modifiée par le mode d'agrégation des atomes, par leur degré d'isolement et par leur température; mais il n'en est pas moins très-probable qu'elle est la cause de la tendance de deux atomes à se combiner chimiquement; combinaison qui, consistant dans la neutralisation des électricités contraires de deux pôles qui viennent en contact, libère en même temps les électricités contraires aussi des deux pôles les plus éloignés. Mais une fois que la combinaison a eu lieu, l'atome composé n'a plus que deux pôles comme l'atome simple, ainsi que nous l'avons expliqué. Maintenant, je le reconnais, l'hypothèse qui consiste à poser en principe, que c'est toujours par le pôle positif de l'atome le plus fortement polaire et par le négatif de celui qui l'est le moins, que l'attraction des deux atomes a lieu, aurait besoin d'être prouvée. Cependant la force expansive plus grande de l'électricité positive comparée à celle de la négative à tension égale, qui est établie par un si grand nombre de phénomènes, donne à notre hypothèse un certain degré de probabilité. Je ne désespère pas, d'ailleurs, qu'on puisse parvenir à la démontrer plus directement.

Si jamais, comme je l'espère, je réussis à obtenir cette démonstration à la suite des recherches électro-chimiques dont je m'occupe actuellement et qui doivent faire l'objet d'un ou-

vrage spécial, j'essayerai en même temps d'insister plus que je ne puis le faire ici sur les rapports théoriques qu'on peut aussi établir entre la chaleur et les effets électriques et chimiques. C'est alors que je pourrai répondre à la dernière des objections que je me suis posée, il y a un instant. Pour le moment, je me bornerai à remarquer que dans la théorie mécanique de la chaleur, il faut avoir égard non pas seulement à la plus ou moins grande vitesse du mouvement de rotation de l'atome, mais aussi à sa masse, et que si pour un même atome la quantité de chaleur augmente avec cette vitesse, il n'en résulte pas que pour deux atomes ayant des masses différentes, il faille une même vitesse de rotation pour qu'ils aient la même température. Et ce qui est vrai pour des atomes isolés, l'est bien davantage pour des molécules formées par l'agrégation d'un plus ou moins grand nombre d'atomes, sur lesquelles l'influence de la masse est bien plus sensible, puisque l'agrégation elle-même résulte de l'attraction due à la masse des atomes. Cette question, comme il est facile de s'en apercevoir, touche aux points les plus délicats de la mécanique rationnelle, et ce n'est que lorsqu'on aura réussi à formuler une bonne théorie mécanique de la chaleur, qu'on pourra la résoudre d'une manière satisfaisante.

En résumé, nous estimons qu'on peut d'une manière générale, et sans risquer de trop se hasarder, distinguer l'affinité chimique de l'attraction physique ou moléculaire, en admettant que l'affinité chimique est l'attraction des atomes s'opérant par leurs pôles électriques contraires qui viennent en contact, de manière que les deux atomes n'en fassent plus qu'un seul dont la polarité est une fonction des polarités des atomes élémentaires, tandis que l'attraction physique résulte de l'action attractive mutuelle que les atomes exercent les uns sur les autres en vertu de leurs masses. Cette dernière attraction ne peut jamais produire le contact, parce que de l'action qu'exerce sur l'éther qui l'enveloppe l'atome en rotation, naît une force répulsive dont l'intensité s'accroît à mesure que l'espace qui sépare les uns des autres les atomes qui s'attirent vient à diminuer. C'est cette force répulsive qui augmente avec la rapidité

de rotation de l'atome, et par conséquent avec sa température.

La distinction que nous venons d'établir entre l'affinité chimique et l'attraction physique nous paraît avoir, entre autres avantages, celui de bien caractériser les traits distinctifs de ces deux formes d'attraction. Dans la première, il y a toujours électricité dégagée et dégagement de chaleur, ainsi que formation d'un composé qui n'a plus aucun rapport physique avec ses éléments constituants; or, c'est ce qui doit résulter de la manière dont nous supposons que s'exerce l'affinité, et en particulier du fait que l'atome composé, une fois qu'il est formé, prend une polarité électrique ou un mouvement de rotation sur son axe qui lui est propre, et qui n'est plus le mouvement de rotation ni de l'un ni de l'autre des atomes constituants. Dans la seconde, c'est-à-dire l'attraction physique, les atomes, en se groupant en vertu de l'attraction de leurs masses, ne viennent point en contact, ne peuvent point par conséquent produire d'effets électriques; ils gardent leur mouvement propre de rotation sur eux-mêmes, ce qui constitue leur individualité. Il peut bien y avoir quelque dégagement de chaleur par l'effet du rapprochement des atomes, comme il y a absorption par le fait de leur éloignement; mais ce sont des phénomènes tout physiques et qui sont liés au travail mécanique qui a lieu dans l'action moléculaire.

Nous ne terminerons pas ce paragraphe sans citer à l'appui de l'hypothèse de la polarité des atomes, une expérience toute récente de M. Foucault qui a réussi, en donnant un mouvement de rotation très-rapide entre les pôles d'un fort électro-aimant à un corps métallique d'une forme arrondie, à produire dans ce corps une forte chaleur. Cette élévation de température provient très-probablement des déplacements successifs et très-rapides qu'éprouvent les particules du corps en rotation, par l'effet de l'influence de l'électro-aimant, déplacements dus eux-mêmes à ce qu'en vertu de leur polarité, les atomes se groupent sous cette influence, dans des directions parallèles à celles des courants de l'électro-aimant, de manière à donner naissance aux courants d'induction. Du reste, nous aurons l'occasion de revenir, à la fin du troisième volume, sur ce sujet

dans un appendice que nous consacrerons aux travaux qui ont été récemment faits sur le magnétisme et sur le diamagnétisme ; nous chercherons alors à compléter la théorie que nous venons d'esquisser et que nous avions déjà exposée en partie dans notre premier volume [1].

[1] Tome I, pages 569 et suivantes.

Liste des principaux travaux relatifs aux sujets traités dans ce chapitre :

Oersted. — Électricité produite par les actions chimiques. — *Ann. de ch. et de phys.* T. XXII, p. 358.

Becquerel. — Effets électriques produits dans les actions chimiques. — *Ann. de ch. et de phys.* T. XXIII, p. 152 et 244 ; t. XXIV, p. 192 ; t. XXV, p. 405 ; t. XXVI, p. 176 ; t. XXVII, p. 5. — Effets électriques dans le contact des liquides et des métaux. T. XXVII, p. 29. — Effets statiques et dynamiques simultanés (B. et Ampère). T. XXVIII, p. 16. — Effet électrique de l'eau oxygénée. T. XXXV, p. 113 ; t. XLI, p. 5 ; t. LX, p 164. — Effet électrique dans le contact de l'eau et de quelques substances cristallisées. — Courants pyro-électriques. — *Arch. des sc. phys.* (*Bibl. univ.*). T. XXVI, p. 173. — Théorie électro-chimique. — *Ann. de ch. et de phys.* (*nouvelle série*). T. XXVII, p. 5. — Électricité dans les actions chimiques. — *Idem.* T. XLII, p. 385. — Quantité d'électricité associée aux particules. — *Comptes rendus de l'Acad. des sciences* (mars 1846) et *Arch. des sc. phys.* (*Bibl. univ.*). T. I, p. 291. — Voyez, pour les travaux de M. Becquerel, les *Ann. de ch. et de phys.*, *passim* et ses deux Traités d'électricité.

Matteucci. — Action chimique intérieure de la pile équivalente à l'action extérieure. — *Bibl. univ.*, t. LVIII (1835), p. 23 et suiv. — Production de l'électricité par action chimique. — *Ann. de ch. et de phys.* (*nouvelle série*). T. XVI, p. 257. — Polarités secondaires. — *Bibl. univ.* (1838). T. XVII, p. 378, et (1840) t. XXVIII, p. 410. — Production de l'électricité voltaïque. *Arch. de l'électricité.* T. IV, p. 65 ; *Arch. des sc. phys.* (*Bibl. univ.*) ; t XII, p. 142 ; t. XVI, p. 319. — Électricité par combustion. — *Arch. des sc. phys.* (*Bibl. univ.*). T. XXVII, p. 235.

Karsten. — Électricité dans le contact des métaux et des liquides. — *Bibl. univ.* (1836). T. V, p. 154.

Pouillet. — Électricité dans la combustion, etc. — *Ann. de ch. et de phys.* T. XXXV, p. 401, et t. XXXVI, p. 5. — Théorie de la pile. *Comptes rendus de l'Acad. des sciences.* T. IV, p. 267. — Quantité d'électricité par l'oxydation du zinc. *Idem.* T. IV, p 785. — *Traité de physique.*

Buff. — Électricité non due à l'évaporation. — *Arch. des sc. phys.* (*Bibl. univ.*). T. XXVI, p. 240. — Électricité par la flamme. — *Idem.* T. XVIII, p. 265, et t. XXVI, p. 335. — Électricité dans le contact des liquides et des métaux. — *Arch. de l'électricité.* T. III, p. 566.

De la Rive. — Action chimique source de l'électricité. — *Ann. de ch. et de*

phys. T. XXXVII, p. 225; t. XXXIX, p. 297; t. LXI, p. 38. — *Bibl. univ.* (1836). T. III, p. 375; t. IV, p. 152 et 359. — Action de l'acide sulfurique sur le zinc. — *Ann. de ch. et de phys.* T. XLIII, p. 425. — Action chimique d'un seul couple. — *Arch. de l'électricité.* T. III, p. 175. — Électricité due à la désoxydation. — *Bibl. univ.* (1836). T. I, p. 151. — Pile à charbon pilé. — *Arch. des sc. phys.* (*Bibl. univ.*) T. XXIV, p. 77. — Voyez, pour les travaux de M. de la Rive sur l'origine chimique de l'électricité voltaïque, les *Mémoires de la Soc. de phys. et d'Hist. nat. de Genève.* T. IV, p. 285, t. VI, p. 149, et t. VII, p. 457, les *Arch. de l'électricité* (1840 à 1845) et les *Arch. des sc. phys.* (*Bibl. univ.*)

Schoenbein. — Théorie de la pile. — *Arch. des sc. phys.* (*Bibl. univ.*). T XIII, p. 192. — Polarités secondaires. — *Bibl. univ.* (1838). T. XVIII, p. 166, 187 et 365. — Effets électro-chimiques. — *Idem* (1839). T. XXIII, p. 189. — Passivité du fer, du bismuth, etc. — *Idem.* T. III, p. 377; t. V, p. 177 et 397; t. IX, p. 41; *Arch. de l'électricité*, t. XI, p. 267, 286, 509 et 513. — Pile à oxy-hydrogène. — *Idem.* T. III, p. 69; t. IV, p. 56. — Pile à effets électro-chimiques. — *Idem.* — T. XXIII (1839). p. 189.

Faraday. — Origine chimique de l'électricité voltaïque. — *Arch. de l'électricité.* T. I, p. 93 et 142. — Quantité d'électricité dans la décomposition de l'eau. — *Bibl. univ.* T. LVIII (1835), p. 305. — Théorie chimique de la pile. — *Bibl. univ.* (1835). T. LVIII, p. 263; *Bibl. univ.* (1840), t. XXVII, p. 192; *Transactions philos. de la Soc. roy. de Londres* et *Phil. Mag. passim.*

Poggendorff. — Forces électromotrices : rapports entre l'action électrique et l'action chimique. — *Arch. de l'électricité.* T. I, p. 168, t. II, p. 5 et 196; t. III, p. 117, 124 et 134; t. IV, p. 285; *Arch. des sc. phys.* t. IV, p. 399. — Force d'une pile non constante. — *Ann. de ch. et de phys.* (*nouvelle série*). T. VII, p. 87. — Lois de la polarisation galvanique. — *Idem.* T. XX, p. 217. — *Annalen der physik et chemie passim.*

Gassiott. — Grande batterie à eau et théorie de la pile. — *Arch. de l'électricité.* T. IV, p. 262. — *Arch. des sc. phys.* T. III, p. 41. — *Transactions philos. de la Soc. royale de Londres de* 1844.

Nobili. — Électricité produite par l'action chimique des dissolutions. — *Bibl. univ.* (1829). T. XXXVII, p. 10; t. LVI (1834), p. 150.

Peltier. — Action des dissolutions. — *Institut.* Vol. V, p. 159 (n° 210). — Quantité d'électricité par l'oxydation d'un grain de zinc. — *Idem.* T. LXVII, p. 412.

Fechner. — Pile de Becquerel à oxygène. — *Ann. der physik.* T. XLVIII, p. 1.

Jacobi. — *Idem.* — *Bibl. univ.* (1838). T. XIV, p. 171. — Constantes de la pile. *Arch. de l'électricité.* T. II, p. 575. — Recomposition du gaz dans le voltamètre. *Ann. de ch. et de phys.* (*nouvelle série*). T. XXV, p. 215.

Gaugain. — Couples gazeux. — *Comptes rendus de l'Acad. des sciences* (octobre 1853) et *Arch. des sc. phys.* (*Bibl. univ.*). T. XXIV, p. 274. — Électricité dans la combustion. — *Arch. des sc. phys.* (*Bibl. univ.*) T. XXVI, p. 67 et 240.

Marianini. — Piles secondaires. — *Ann. de ch. et de phys.* T. XXXVIII, p. 5.

— Piles voltaïques. — *Idem*. T. XXXVIII, p. 337 et 442. — *Idem*. T. XLV, p. 118.

Grove. — Pile à gaz. — *Arch. de l'électricité*. T. III, p. 489. — Réaction voltaïque. — *Idem*. — T. IV, p. 148. — *Idem*. — *Arch. des sc. phys.* (*Bibl. univ.*). T II, p. 354. — Électricité de la flamme. — *Idem*. T. XVII, p. 240, et t. XXV, p. 276. — *Trans. of royal Society* et *Phil. Mag. passim*.

Beetz. — Fer passif. — *Arch. de l'électricité*. T. IV, p. 509. — Pouvoir électromoteur des gaz. — *Arch. des se. phys.* (*Bibl. univ.*) T. XII, p. 285.

Nicklès. — Passivité du cobalt et du nickel. — *Arch. des sc. phys.* (*Bibl. univ.*). T. XXIV, p. 79.

E. Becquerel. — Propriétés électro-chimiques de l'hydrogène. — *Ann. de ch. et de phys.* (*nouvelle série*). T. XXXVII, p. 385. — Influence des gaz sur l'électricité de contact. — *Arch. des sc. phys.* (*Bibl. univ.*) T. II, p. 59. — Effets électriques dus au mouvement des couples. — *Ann. de ch. et de phys.* (*nouv. série*). T. XLIV, p. 401.

Mousson. — Fer passif. — *Bibl. univ.* T. V (1836), p. 165. — Électricité dans l'action des dissolutions. — *Bibl. univ.* T. XXI (1839), p. 170.

Riess. — Électricité par combustion. — *Arch. de l'électricité*. T. V, p. 91.

Hankel. — *Idem*. — *Arch. des sc. phys.* (*Bibl. univ.*). T. XVII, p. 5.

Viard. — Influence de l'oxygène sur la pile. — *Ann. de ch. et de phys.* (*nouvelle série*). T. XXXVI, p. 129, et t. XLII, p. 5.

Daniell. — Combinaisons voltaïques. — *Arch. de l'électricité*. T. III, p. 623.

Smee. — Pile à argent platiné. — *Bibl. univ.* T. XXVII (1840), p. 186 et p. 386.

Silliman. — Pile à charbon. — *Arch. de l'électricité*. T. III, p. 649.

Bunzen. — Pile voltaïque et préparation des charbons. — *Ann. de ch. et de phys.* (*nouvelle série*). T. VIII, p. 28.

Callan. — *Idem*. — *Arch. des sc. phys.* (*Bibl univ.*). T. VI, p. 47. — *Idem*. — T. XXIX, p. 162.

Wheatstone. — Forces électromotrices. — *Ann. de ch. et de phys.* T. X, p. 257. *Trans. phil. de la Société royale de Londres* (1843).

Goodmann. — Pile avec potassium. — *Arch. des sc. phys.* (*Bibl. univ.*). T. IX, p. 305.

J. Regnauld. — Forces électromotrices. — *Ann. de ch. et de phys.* (*nouvelle série*). T. XLIV, p. 453.

Svanberg. — Force polarisante de l'hydrogène. *Arch. des se. phys.* (*Bibl. univ.*) T. IV, p. 296.

Lenz et Saweljew. — Pouvoir électromoteur des gaz. — *Ann. de ch. et de phys.* (*nouvelle série*). — T. XX, p. 184.

Kohlrausch — Rapports entre la force électromotrice et la tension. — *Ann. de ch. et de phys.* (*nouvelle série*). T. XLI, p. 357.

Joule. — Combinaisons voltaïques. — *Arch. de l'électricité*. T. IV, p. 269. — Origine électrique de la chaleur chimique. — *Ann. de ch. et de phys.* (*nouvelle série*). T. XVI, p. 474.

Volta. — Électricité de contact. — *Ann. de ch.* T. XXIX, p. 91 ; t. XL, p. 217, et t. XLI, p. 3, 65 et 106.

Biot. — *Idem.* — *Traité de physique expérimentale et mathématique.* Paris, 1816.

Péclet. — *Idem.* — *Ann. de ch. et de phys.* (*nouvelle série*). T. II, p. 233.

Zamboni. — Piles sèches. — *Ann. de ch. et de phys.* T. II, p. 190, et t. XXIX, p. 198. — *Bibl. univ.* (1837). T. VIII, p. 189.

Delezenne. — *Idem.* — *Arch. de l'électricité.* T. V, p. 67.

Cooke. — Affinité et force électromotrice. — *Arch. des sc. phys.* (*Bibl. univ.*). T. XVII, p. 322.

Favre. — Rapports entre la chaleur, l'affinité et la force électromotrice. — *Ann. de ch. et de phys.* (*nouvelle série*). T. XL, p. 193.

Wood. — Chaleur développée par l'oxydation. — *Arch. des sc. phys.* (*Bibl. univ.*). T. XXII, p. 82.

Bonsdorff. — Oxydation dans l'air. *Bibl. univ.* T. XVIII (1838), p. 373.

Foucault. — Chaleur développée par l'influence magnétique sur un corps en mouvement. — *Comptes rendus de l'Acad. des sciences.* T. XLI, p. 450 (17 septembre 1855).

NOTES

RELATIVES

AUX DÉVELOPPEMENTS MATHÉMATIQUES

DE QUELQUES POINTS PARTICULIERS [1].

NOTE A (p. 10).

RELATIVE A LA PROPAGATION DE L'ÉLECTRICITÉ.

Nous avons dit que M. Kirchoff avait cherché à déterminer les lois de la propagation de l'électricité dans les cas autres que celui de la propagation linéaire et en particulier dans celui d'une plaque conductrice. Il nous est impossible de reproduire dans cette note le travail de M. Kirchoff; nous nous contenterons d'exposer la marche qu'il a suivie et de montrer comment, en partant des principes établis par Ohm, principes que Ohm lui-même a appliqués à la propagation linéaire de l'électricité, il est parvenu à déterminer l'état stationnaire que prennent les tensions électriques aux divers points d'une plaque conductrice placée dans le circuit d'une pile, et comment les résultats déduits de ses calculs ont pu être vérifiés expérimentalement.

M. Kirchoff admet, d'après Ohm, que, s'il y a entre deux élements infiniment voisins d'un même conducteur linéaire une différence de tension (qui est nécessairement infiniment petite), il passe constamment de l'un de ces éléments à l'autre une quantité d'électricité proportionnelle à la différence des tensions, à la section du conducteur, au coefficient de conductibilité et inversement proportionnelle à la distance des deux éléments. Ces principes, qui sont les mêmes que nous avons déjà établis pour la propagation linéaire, une fois admis, voici comment Kirchoff y applique le calcul.

Le lieu des points où la tension a une même valeur déterminée, forme en général une courbe qui jouit de la propriété d'être normale en chacun de ses points à la direction suivant laquelle l'électricité se propage, puisqu'il résulte immédiatement du principe posé ci-dessus, qu'il n'y a aucun mouvement de l'électricité d'un point à un autre de cette courbe. D'après cela, la connaissance des courbes d'égale tension conduira évidemment à la connaissance complète de la propagation de l'électricité. Or, pour arriver aux équations de ces courbes, il faut d'abord trouver l'expression de la tension u en un point quelconque de la plaque en fonction des coordonnées de ce point, et l'équation qu'on obtiendra en égalant cette fonction des coordonnées à une constante, sera l'équation d'une courbe d'égale

[1] Tous les développements ne sont pas exclusivement mathématiques; il est surtout deux des notes (la note C et la note E) dont les développements sont purement physiques.

Digitized by Google

tension pour une tension déterminée; toutes les autres s'obtiendront de même en faisant varier la constante.

M. Kirchoff commence par chercher l'expression de la quantité d'électricité qui passe dans l'unité de temps à travers un élément quelconque d'une courbe; pour cela il considère d'abord deux courbes d'égale tension infiniment voisines, et sur ces courbes deux éléments compris entre les mêmes normales; le parallélipipède ayant pour base le rectangle compris entre les deux éléments et les deux normales et pour hauteur l'épaisseur de la plaque peut être assimilé à un conducteur linéaire, puisque l'électricité ne s'y propage que parallèlement aux normales. Par conséquent, si on appelle ds la longueur de l'élément pris sur la première courbe, dr la distance des deux courbes comptée sur la normale, δ l'épaisseur de la plaque, k le coefficient de conductibilité, la quantité d'électricité qui traverse dans l'unité de temps l'élément ds, est représentée d'après les principes de Ohm par :

$$-k\,\delta\,ds\,\frac{du}{dr}\,^{1}.$$

Menons une parallèle à l'axe des x qui traverse le rectangle, soit φ l'angle que fait cet axe avec la normale aux courbes d'égale tension et s la portion de cette parallèle interceptée entre les deux normales, on a : $ds = r\,sin.\,\varphi$, et l'expression précédente devient :

$$-k\,s\,\sin.\,\varphi\,\frac{du}{dr}.$$

Soient x et y les coordonnées de l'extrémité de l'élément ds, $x + dx$ et $y + dy$, celles de l'extrémité correspondante de l'élément de la seconde courbe, on a :

$\frac{du}{dr} = \frac{du}{dx}.\frac{dx}{dr} + \frac{du}{dy}.\frac{dy}{dr}$ et comme $\frac{dx}{dr} = \cos.\,\varphi$ et $\frac{dy}{dr} = \sin.\,\varphi$, on a :

$$\frac{du}{dr} = \frac{du}{dx}\cos.\,\varphi + \frac{du}{dy}\sin.\,\varphi.$$

D'un autre côté $\frac{du}{ds} = o$ puisqu'il s'agit d'une courbe d'égale tension, condition qui se met sous la forme de : $\frac{du}{dr}\,sin.\,\varphi - \frac{du}{dr}\,cos.\,\varphi = o.$

On tire des deux équations précédentes la valeur de $sin.\,\varphi$ et en la portant dans l'expression trouvée ci-dessus pour le flux d'électricité, on obtient pour cette expression :

$$-k\,\delta\,s\,\frac{du}{dy}.$$

Or, il faut aussi remarquer que c'est l'expression de la quantité d'électricité qui traverse s, c'est-à-dire l'élément d'une courbe quelconque ds,

[1] Le signe — provient de ce que l'électricité passe d'une courbe de plus forte à une courbe de moins forte tension.

puisque la direction des axes était complétement arbitraire, en sorte que l'électricité qui traverse dans l'unité de temps un élément de courbe se trouve représentée par $-k\delta\, ds \frac{du}{dN}$, en désignant par du la variation de tension qui correspond à un déplacement infiniment petit dN compté sur la normale à la courbe.

Il ne s'agit plus maintenant que d'établir les équations différentielles en exprimant que l'état de la plaque est devenu stationnaire. D'abord si l'on conçoit sur la surface une courbe fermée qui ne contienne aucun des points par où l'électricité pénètre ou d'où elle sort, il doit sortir de l'espace qu'elle enveloppe autant d'électricité qu'il doit y en entrer, ce qui exige qu'on ait :

$$\int ds \frac{du}{dN} = 0.$$

En second lieu, si l'on conçoit une courbe fermée qui enveloppe un électrode par lequel il arrive dans l'unité de temps une quantité E d'électricité, on devra avoir :

$$-k\delta \int ds \frac{du}{dN} = E.$$

Enfin, si la plaque est limitée, il faudra qu'on ait sur tout le contour $\frac{du}{dN} = o$, condition qui exige que les courbes d'égale tension se terminent normalement au contour de la plaque.

Le problème est donc mis ainsi en équation, et M. Kirchoff l'a résolu dans sa plus grande généralité. Dans le cas de deux électrodes A_1 et A_2 faisant circuler dans l'unité de temps sur la plaque une quantité E d'électricité, M. Kirchoff trouve pour u l'expression suivante :

$$u = M + \frac{E}{rk\pi\delta} \log. \frac{r_2}{r_1}.$$

dans laquelle M est une constante qu'on détermine par la connaissance de la tension en un seul point de la plaque, et dans laquelle r_1 et r_2 sont les distances d'un point quelconque de la plaque aux deux électrodes A_1 et A_2.

D'après ce que nous avons dit, les équations des courbes d'égale tension seront $\frac{r_2}{r_1}$ = constante ; ces courbes sont donc des cercles qui ont leurs centres sur la ligne A_1 A_2 dans une situation telle que les extrémités du diamètre de chaque cercle soient placées harmoniquement par rapport aux points A_1 et A_2 ; les courbes, normales aux précédentes, sont en conséquence tous les cercles qui passent par les deux électrodes, et il résulte de là que ce cas se trouve être celui d'un disque circulaire communiquant aux deux électrodes par deux points de sa circonférence, puisque la condition relative au contour est précisément satisfaite.

M. Kirchoff a vérifié les résultats de sa théorie par des expériences variées. Il a d'abord étudié la forme des lignes d'égale tension sur une

plaque circulaire communiquant par deux points de son contour avec les électrodes d'une pile. Pour cela, on touchait la plaque avec les extrémités du fil d'un galvanomètre et on déterminait les positions relatives qu'il fallait donner à ces deux extrémités pour ne produire aucune déviation de l'aiguille; dans ce cas, les deux points de contact appartenaient à une courbe d'égale tension, car il est clair que le contact des bouts du fil galvanométrique n'apportait aucune perturbation à l'état électrique de la plaque. M. Kirchoff a vérifié ainsi d'une manière très-satisfaisante la forme et la position assignée par la théorie à ces courbes.

En second lieu, l'expression $u = M + N \log. \frac{r_2}{r_1}$ s'est trouvée parfaitement d'accord avec les résultats obtenus par une autre série d'expériences dans lesquelles la différence des tensions de deux points pris sur la plaque était neutralisée par la force électro-motrice d'un couple thermo-électrique qui servait à la mesure de cette différence.

La résistance d'un disque métallique, dont M. Kirchoff a aussi déterminé l'expression théorique, s'est trouvée toujours beaucoup trop faible pour se prêter à une mesure exacte.

Enfin, M. Kirchoff a fait une autre série d'expériences en mesurant les déviations d'une petite aiguille aimantée suspendue à une très-petite distance, successivement au-dessus des divers points du disque; il a trouvé ces déviations d'accord avec celles qu'il avait déterminées théoriquement de la manière suivante :

Si la distance de l'aiguille au plateau est suffisamment petite, les actions électro-dynamiques des points du plateau, situés immédiatement au-dessous des deux pôles de l'aiguille, contribuent seules à la faire dévier. Or, soit φ l'angle que fait la direction du courant en un point du disque avec le méridien magnétique pris pour axe des x, soit i l'intensité de ce courant en ce même point, X et Y les composantes suivant les axes des x et des y de l'action électro-dynamique exercée sur le pôle situé au-dessus de ce point, on aura :

$$X = ki \sin. \varphi, \text{ et } Y = ki \cos. \varphi.$$

k étant une constante. D'après la théorie précédente, u désignant la tension en ce même point, on a :

$$i \sin. \varphi = m \frac{du}{dy} \text{ et } i \cos. \varphi = m \frac{du}{dx}$$

m étant une constante; d'où l'on tire, en posant $mk = \mu$,

$$X = \mu \frac{du}{dy} \text{ et } Y = \mu \frac{du}{dx}.$$

Considérons maintenant une petite aiguille aimantée mobile autour de son centre. Soient u' et u'' les tensions des points du disque situés au-dessous de chacun des deux pôles; on a :

$$X' = \mu \frac{du'}{dy} \text{ et } Y' = \mu \frac{du'}{dx} \text{ pour l'un des points, et}$$

$$X'' = \mu \frac{du''}{dy} \text{ et } Y'' = \mu \frac{du''}{dx} \text{ pour l'autre point.}$$

Or, pour que l'aiguille soit en équilibre, il faut que le moment de ces forces, pris par rapport à son milieu, soit proportionnel au moment magnétique. Si donc ψ est la déviation fixe qu'éprouve l'aiguille, on aura :

$$\text{Sin.}\psi = M\left(\frac{du'}{dy}\sin.\psi - \frac{du'}{dx}\cos.\psi + \frac{du''}{dy}\cos.\psi - \frac{du''}{dx}\sin.\psi\right).$$

On remplacera les dérivées de u par leurs valeurs tirées de l'expression de la tension considérée aux deux points placés au-dessous des pôles, et M. Kirchoff arrive ainsi pour ψ à l'expression suivante :

$$\psi = k\,\frac{(R-L)(R+L)+\rho^2}{\{(R-L)^2+\rho^2\}\{(R+L)^2+\rho^2\}}.$$

dans laquelle R est le rayon du disque, 2L la longueur de l'aiguille aimantée, et ρ la distance du centre de l'aiguille au centre de la plaque. Les résultats de l'expérience sont parfaitement d'accord avec ceux que donne cette formule.

Dans deux mémoires publiés quelque temps après le travail de M. Kirchoff, M. Smaasen a traité la question de la propagation de l'électricité, non-seulement dans un plan, mais dans un conducteur à trois dimensions; la méthode qu'il suit est analogue à celle que nous venons d'étudier; au lieu de couches d'égale tension, ce sont des surfaces d'égale tension que l'on considère; le flux d'électricité qui traverse pendant le temps infiniment petit dt, un élément superficiel ds, est encore :

$$-k\,ds\,dt\,\frac{du}{dN}.$$

et l'équation différentielle à laquelle M. Smaasen parvient en exprimant l'état stationnaire du conducteur est :

$$\frac{d^2u}{dx^2} + \frac{d^2u}{dy^2} + \frac{d^2u}{dz^2} = 0,$$

qui dans le cas d'une plaque devient : $\frac{d^2u}{dx^2} + \frac{d^2u}{dy^2} = 0,$

relation qui n'est qu'une transformation de celle obtenue par Kirchoff sous la forme : $\int ds\,\frac{du}{dN} = 0$ [1].

[1] Nous avons tiré les détails qui précèdent des excellents extraits que M. Verdet a donnés des travaux de M. Kirchoff et de ceux de M. Smaasen dans les *Annales de chimie et de physique*, t. X, p. 115, 236 et 327; extraits auxquels nous renvoyons les personnes qui désirent approfondir davantage ce sujet difficile et intéressant.

NOTE B (p. 28).

RELATIVE AUX COURANTS DÉRIVÉS.

Soient I l'intensité du courant *primitif*, I' l'intensité du courant *principal*, i et i' les intensités respectives des courants *partiel* et *dérivé*. Soient l et l' les résistances ou les longueurs réduites des portions de circuit correspondantes au courant partiel et au courant dérivé ; L étant la résistance ou la longueur réduite de la portion du circuit qui ne change pas, c'est-à-dire qui est comprise entre les points de dérivation, la résistance pour le courant *primitif* est $L+l$. On a, en appelant E la force électromotrice :

$$I=\frac{E}{L+l} \text{ et } I'=\frac{E}{L+\frac{ll'}{l+l'}}=\frac{E(l+l')}{L(l+l')+ll'}.$$

En effet, la résistance pour le courant principal est L, longueur réduite de la partie constante du circuit, plus celle du conducteur formé par les deux longueurs réduites l et l' qui équivaut, comme nous l'avons vu (p. 26, *note*), à celle d'un seul circuit dont la longueur est égale à $\frac{ll'}{l+l'}$

On sait en outre que les proportions du courant qui passent respectivement dans deux conducteurs aboutissant aux mêmes points de jonction, sont en raison inverse des résistances de ces deux conducteurs, pourvu qu'ils ne renferment pas de force électromotrice ; on a donc :

$$i : i' = l' : l, \text{ d'où } i : i+i' = l' : l+l', \text{ d'où on tire :}$$

$$i=(i+i')\frac{l'}{l+l'}=\frac{El'}{L(l+l)+ll'},$$

en mettant à la place de $i+i'=I$ la valeur de I.

On a de même $i'=\frac{El}{L(l+l')ll'}$.

Telles sont les valeurs des courants primitif, principal, partiel et dérivé; comme on le voit, elles sont déterminées en se fondant uniquement sur les lois de Ohm. On peut les déduire aussi des formules auxquelles conduisent les lois de Kirchoff appliquées au cas particulier que nous venons d'envisager, le plus simple de ceux que présentent les courants dérivés. En effet, ces lois permettent de déterminer, dans le cas où la dérivation est multiple, l'intensité et le sens du courant dans chaque fil de dérivation pourvu qu'on connaisse la résistance de chaque portion du circuit comprise entre deux points de dérivation successifs et la force électro-motrice. Voici ces lois :

1° En considérant comme positives les intensités des courants qui convergent vers un *nœud*, c'est-à-dire vers un point de dérivation, et comme négatives celles des courants qui en divergent, la somme algébrique des

Digitized by Google

intensités des courants qui aboutissent à un même nœud est nulle. On a : $\Sigma i = o$.

2° Dans un circuit quelconque fermé et unique, la somme algébrique des forces électromotrices comptées comme positives si elles déterminent un courant dans un certain sens pris arbitrairement, et comme négatives si elles le déterminent en sens contraire, est égale à la somme des produits qu'on obtient en multipliant l'intensité du courant qui circule dans chaque portion comprise entre deux nœuds (les intensités étant comptées dans le même sens que les forces électromotrices), par la résistance de ce conducteur : $\Sigma e = \Sigma il$. On voit comment, dans le cas où $\Sigma e = o$, c'est-à-dire dans le cas que nous avons traité, on a $\Sigma il = o$, ce qui donne $il = i'l'$ ou $i : i' = l' : l$.

Comme on ne connait pas d'avance le sens de chaque courant dérivé, il semble que la première loi soit complétement inutile. Mais en attribuant un sens arbitraire à chaque courant et en établissant les formules que donnent les lois de Kirchoff, on est conduit à une valeur positive de i, si le sens pris arbitrairement était le bon, et à une valeur négative dans le cas contraire.

M. Wheatstone a appliqué les propriétés des courants dérivés à la construction de plusieurs appareils destinés à mesurer soit les résistances, soit les intensités des courants, de manière à remplacer avantageusement le rhéostat. L'appareil destiné à mesurer les résistances est fondé sur l'égalité des intensités du courant dérivé et du courant partiel, lorsque les deux conducteurs qui les transmettent présentent des résistances égales. Il est combiné de façon que dans son état normal, les courants qui se divisent entre les fils conducteurs dont il est formé tendent à traverser le fil d'un galvanomètre dans des sens contraires, de sorte que, si ces courants sont égaux, l'aiguille n'éprouve aucune déviation. On introduit alors la résistance inconnue qu'on veut mesurer dans un des systèmes des fils conducteurs de l'appareil, ce qui fait dévier l'aiguille; alors, pour la ramener à sa position primitive, on introduit dans l'autre système des fils conducteurs, une résistance qui est nécessairement égale à la résistance inconnue et qui lui sert de mesure. L'appareil est composé de quatre fils métalliques semblables disposés sur une planchette en bois de manière à former un losange. Les deux pôles de la pile sont placés aux deux angles aigus de ce losange, et les deux bouts du fil du galvanomètre aux deux angles obtus. Des interruptions, soit des solutions de continuité sont ménagées dans deux des côtés du losange, savoir ceux qui forment l'un des angles obtus, dont le sommet est le point d'attache de l'une des extrémités du fil galvanométrique. C'est l'une de ces interruptions qui est comblée par la résistance qu'on veut mesurer, pendant que l'autre l'est par la résistance connue, laquelle est égale à la résistance inconnue quand l'aiguille du galvanomètre reste à 0°.

Un autre appareil, fondé sur les mêmes principes, a pour objet de dé-

terminer avec exactitude la déviation de l'aiguille du galvanomètre qui correspond à un courant d'une intensité moitié de celle du courant qui a produit une déviation donnée. Soit E la force électromotrice, r la résistance du galvanomètre, R la somme de toutes les résistances du circuit. On a $I = \frac{E}{R+r}$. En introduisant dans le circuit un fil de dérivation dont la résistance soit égale à celle du galvanomètre, c'est-à-dire à r, l'intensité du courant principal devient $\frac{E}{R+\frac{r}{2}}$; le fil de dérivation est placé de manière que c'est par le fil du galvanomètre que passe le courant partiel qui est égal au courant dérivé, puisque ce fil et le fil de dérivation ont la même résistance. Si maintenant on introduit dans la portion principale du circuit une résistance égale à $\frac{r}{2}$, c'est-à-dire un fil dont la résistance soit égale à la moitié de celle du galvanomètre, l'intensité du courant principal deviendra $\frac{E}{R+\frac{r}{2}+\frac{r}{2}} = \frac{E}{R+r}$, c'est-à-dire égale à celle du courant primitif, avec cette seule différence que ce n'est plus que la moitié de ce courant qui passe par le fil du galvanomètre, tandis qu'auparavant c'était le courant tout entier. Il en résulte que les deux déviations de l'aiguille correspondent à des courants dont les intensités sont exactement l'une la moitié de l'autre.

Nous ne nous arrêterons pas à la description de l'appareil, facile du reste à concevoir, au moyen duquel M. Wheatstone a mis en pratique la méthode que nous venons d'expliquer. Nous nous bornerons à remarquer que cette méthode peut servir à mesurer les courants sans introduire dans leur circuit le fil d'un galvanomètre, introduction qui présente l'inconvénient de modifier notablement les conditions de ce circuit, du moins dans la plupart des cas, ou, lorsqu'il s'agit de courants énergiques, de ne pouvoir se servir de galvanomètres sensibles. Il suffit, en effet, d'attacher les deux extrémités du fil galvanométrique à deux points du conducteur par lequel passe le courant qu'on veut mesurer; on obtient ainsi au galvanomètre un courant dérivé dont l'intensité est à celle du courant primitif comme $\frac{n}{n+1} : 1$, n étant le rapport qui existe entre la résistance du fil de dérivation qui est ici celui du galvanomètre et celui du fil conducteur du courant partiel. Seulement, il faut avoir soin d'ajouter dans la portion principale du circuit, un fil dont la résistance soit $\frac{r}{n+1}$, afin que, en compensant l'effet de l'addition du fil de dérivation, on amène le courant principal à demeurer égal au courant primitif. Il est aisé, en prenant les formules qui donnent les valeurs des courants primitif, principal, partiel et dérivé, d'obtenir les résultats que nous venons d'énoncer, pourvu qu'on ait soin de remplacer dans ces formules l résistance du conducteur par-

tiel par r, et l' celle du fil de dérivation, par nr celle du fil du galvanomètre.

Il s'agit seulement de connaître r et nr. Le rhéostat peut donner facilement ces deux valeurs; mais quand il s'agit de déterminer nr, c'est-à-dire la résistance du fil du galvanomètre, l'emploi du rhéostat exige qu'on ait un second galvanomètre auxiliaire. M. Wheatstone a indiqué une méthode qui permet de s'en passer, et qui consiste à avoir deux couples parfaitement semblables, ce qui n'est pas difficile. En appelant g la résistance cherchée du fil du galvanomètre, on a pour l'expression de l'intensité du courant avec un seul couple $\frac{E}{R+r+g}$, en désignant par R la résistance du couple et par r celle du circuit extérieur au couple, non compris le fil du galvanomètre. Si l'on met les deux couples égaux en série, et qu'on nomme λ la résistance, soit la longueur réduite, du conducteur qu'il faut ajouter au circuit pour que le courant ait la même intensité qu'il avait lorsqu'il n'y avait qu'un couple, on a pour l'expression de l'intensité : $\frac{2E}{2R+r+g+\lambda}=\frac{E}{R+r+g}$, d'où on tire $g=\lambda-r$.

Parmi les nombreuses questions qui se rattachent à la théorie des courants dérivés, il en est une qui a beaucoup occupé les physiciens et qui n'est pas encore résolue; c'est de savoir si un même conducteur peut être traversé en même temps par deux courants dirigés en sens contraires. On avait cru pouvoir résoudre la question en prenant deux piles semblables réunies par leurs pôles opposés au moyen de deux fils conducteurs parallèles : puis, on unissait directement ces deux fils par un gros fil bon conducteur transversal, en ayant soin que les deux circuits partiels formés ainsi fussent parfaitement semblables, ce dont on s'assurait en prenant pour conducteur transversal le fil d'un galvanomètre qui ne devait éprouver aucune déviation, si les deux circuits partiels étaient parfaitement égaux. On observait alors l'intensité du courant transmis à travers les deux circuits partiels, d'abord avec le conducteur transversal, ensuite quand il était enlevé ; or cette intensité restait exactement la même, que le conducteur y fût ou n'y fût pas, d'où l'on concluait qu'il ne transmettait aucune portion de courant. Il est facile de voir que cette constance dans l'intensité du courant peut aussi bien s'interpréter, en admettant que le conducteur transversal transmet par dérivation une certaine proportion du courant de chacune des piles, qu'en admettant qu'il n'en transmet point. Il n'y a qu'à prendre, pour le courant de chacune des deux piles, l'expression du courant dérivé et du courant partiel, pour voir que l'addition du conducteur transversal ne fait rien changer à l'égalité, compensant exactement d'un côté ce qu'elle fait perdre de l'autre.

On voit donc qu'au point de vue pratique la question n'a point d'importance, et qu'elle est parfaitement bien résolue par la théorie des courants dérivés. Au point de vue théorique, il nous semble qu'il est difficile d'ad-

mettre que les mêmes molécules successives d'un conducteur puissent transmettre à la fois deux courants dirigés en sens contraire. En effet, il faudrait pour cela que les particules fussent à la fois polarisées dans deux sens opposés, ce qui est impossible. Il nous paraît plus probable que si les deux courants contraires sont parfaitements égaux, les deux polarisations opposées se détruisent, et qu'ainsi il n'y a aucune propagation de l'électricité. Si les deux courants sont inégaux, les molécules sont polarisées avec une intensité égale à la différence d'intensité des deux courants; il ne passe par conséquent à travers le fil conducteur qu'un courant qui est la différence des deux courants contraires. Les choses se passeraient donc dans ce cas comme dans celui de deux couples opposés, cas dans lequel nous avons été amenés à reconnaître qu'il n'y a transmission que d'un seul courant dû à la différence de force électromotrice des deux couples, et non pas de deux courants indépendants produits séparément par chacun des couples [1].

Nous avons supposé que les deux courants contraires étaient appelés à passer à travers la même file de molécules, ce qui est le cas quand ils aboutissent exactement aux mêmes points des deux extrémités d'un même conducteur. Mais s'ils n'aboutissent pas aux mêmes points, et si ce conducteur a de grandes dimensions, il nous paraît très-probable que les deux courants peuvent passer en même temps en sens contraire, et qu'alors ils sont propagés par des séries différentes de molécules. Toutefois, il est difficile, vu la tendance à la dissémination, soit à l'expansion du courant, qu'il y ait une indépendance complète des deux courants, et que leur présence simultanée dans le même conducteur ne modifie pas la route qu'ils suivraient s'ils traversaient seuls et séparément ce conducteur. Il y aurait là une étude intéressante à faire; elle avait été commencée par M. Nobili [2]; mais une mort prématurée avait empêché ce savant et ingénieux physicien de la poursuivre comme il comptait le faire. Espérons qu'elle sera reprise et nous ne doutons pas qu'elle ne conduise à des résultats importants.

NOTE C (p. 95).

RELATIVE AUX LOIS DES DÉCHARGES DES BATTERIES ÉLECTRIQUES.

Voici comment Riess est parvenu à établir la loi de la proportionnalité de la portée explosive de la décharge à la densité de l'électricité accumulée sur le conducteur d'où part l'étincelle; loi qui s'exprime par la formule $d = b.\frac{q}{s}$; d exprimant la distance à laquelle a lieu la décharge, soit la portée explosive, q la quantité absolue d'électricité accumulée, s la surface du conducteur (le rapport $\frac{q}{s}$ étant ainsi la densité moyenne de l'électricité),

[1] Voyez plus haut, tome II, page 757.

[2] *Bibliothèque universelle*, t. LIX (1835), p. 263 et 416.

et enfin b étant une constante. Nous avons déjà vu que les expériences de Riess au moyen du micromètre à étincelles déterminent cette constante b et donnent une vérification remarquable de la loi, tellement qu'en partant de la valeur trouvée pour b, qui est 0,833, on peut se servir de la formule ci-dessus pour en tirer q, quand on connaît d et s. Mais il nous reste à connaître la méthode que Riess a suivie pour établir la loi. Elle consiste à faire varier la distance des disques d'un condensateur, et à mesurer, au moyen de la balance de torsion, la densité de l'électricité libre sur le plateau collecteur. On construit ainsi des tableaux où se trouvent en regard les distances des plateaux et les densités correspondantes de l'électricité libre. Dans une seconde série d'expériences, on fait passer la distance des disques par les mêmes valeurs que dans la première série, et en mesurant les portées explosives au moyen du micromètre à étincelles, on obtient de nouveaux tableaux où se trouvent en regard les distances des plateaux et les portées explosives correspondantes. Dès lors, il ne reste plus qu'à constater qu'il existe approximativement entre les densités les mêmes rapports qu'entre les portées explosives.

L'appareil condensateur se compose de deux disques en laiton supportés verticalement sur des pieds isolants, et dont l'un, le condensateur, est disposé de façon à glisser le long d'une règle graduée dont les divisions indiquent les distances respectives des deux disques. A la surface extérieure du collecteur est fixé normalement un fil conducteur terminé par une boule; c'est la densité électrique de cette sphère qui sert de mesure à celle du plateau; la détermination de cette densité se fait ensuite avec une petite boule d'épreuve, qu'on place au 0° de la balance de torsion; le rapport des angles de torsion donne le rapport des densités qui varient avec la distance des disques [1]. Riess prend pour unité la densité électrique du collecteur pour une distance infinie du condensateur, c'est-à-dire lorsque celui-ci n'agit plus. Voici un des tableaux ainsi construits :

Distances des disques.	∞	30	20	13	10	5	4	3	2
Densités.	1	0,897	0,683	0,593	0,492	0,333	0,286	0,233	0,173

La mesure des portées explosives se fait au moyen du micromètre à étincelles, dont la boule fixe communique avec la sphère du collecteur et la boule mobile avec le sol. Voici un tableau correspondant au précédent et

[1] Il faut remarquer en effet qu'on commence par charger le disque collecteur, quand il est hors de l'influence du disque condensateur, de toute l'électricité que peut lui transmettre la source avec laquelle il est en communication, puis on approche graduellement le collecteur de manière à diminuer constamment la quantité d'électricité libre, qui doit en effet devenir d'autant moindre que les disques sont plus rapprochés, la quantité totale d'électricité restant toujours constante. — C'est cette quantité libre dont on compare la densité et la portée explosive.

dans lequel l'unité de portée explosive est celle qu'on trouve pour une distance infinie des disques.

Distances des disques.	∞	50	20	10	5	2
Portées explosives.	1	0,914	0,687	0,451	0,272	0,105

On voit, en comparant les deux tableaux, que les résultats numériques concordent d'autant mieux que la distance des disques est plus grande, ce qui tient sans doute à l'influence de la boule mobile sur la fixe, influence dont l'énergie s'accroît très-rapidement lorsque les deux boules se rapprochent. C'est au moyen d'un grand nombre d'expériences analogues à celles dont les résultats sont contenus dans les tableaux ci-dessus, que Riess parvient à la loi importante que *la distance explosive en un point du disque collecteur est proportionnelle à la densité électrique en ce point.*

NOTE D (p. 157 et 170).

RELATIVE AU THERMOMÈTRE ÉLECTRIQUE ET AU RÉCHAUFFEMENT DES FILS PAR LE PASSAGE DE L'ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE.

Voici la manière dont Riess établit la formule qui, dans le thermomètre électrique, donne la température du fil traversé par la décharge, quand on a observé l'abaissement du liquide dans le tube thermométrique.

Soit T la température du fil au moment où la décharge passe. C'est celle qu'il s'agit de déterminer. L'échauffement du fil élève la température de l'air du ballon et le fait passer de t à t', sa force élastique augmente par conséquent, et devient p' de p qu'elle était; or, on a la relation suivante : $\frac{p'}{p}=\frac{1+\alpha t'}{1+\alpha t}$, ou $p'-p=p\frac{t'-t'}{\frac{1}{\alpha}+t}$, dans laquelle α est le coefficient de dilatation de l'air, et p la pression barométrique observée au moment de l'expérience que nous désignerons plus bas par b.

Soit θ le nombre de divisions parcourues par le liquide (l'unité employée par Riess est la ligne), soit φ l'angle que fait la direction du tube gradué avec la verticale; $\theta \cos. \varphi$ est la hauteur de la colonne du liquide déplacée par la force élastique de l'air du ballon, et $\theta \frac{\cos. \varphi}{u}$ la hauteur de cette colonne ramenée à ce qu'elle serait si le liquide était du mercure. On aurait donc $b+\frac{\theta \cos. \varphi}{u}=p'$, si l'on ne tenait pas compte du changement de volume de l'air. Or, soit K le volume primitif de l'air exprimé en lignes cubes, soit d la section du tube; le rapport des deux volumes occupés par la même masse d'air est, en faisant

$$\frac{K}{d}=k;\ \frac{k+\theta}{k} \text{ ou } 1+\frac{\theta}{k}. \text{ On a donc : } p'=\left(b+\frac{\theta \cos. \varphi}{u}\right)\left(1+\frac{\theta}{k}\right).$$

En remplaçant p et p' par leurs valeurs dans la première équation ci-dessus et ordonnant par rapport à θ, on arrive à l'équation suivante :

$$\theta^2 + \theta\left(\frac{bu}{\cos.\varphi} + k\right) - \frac{kub}{\cos.\varphi}\,\frac{(t'-t)}{\left(\frac{1}{\alpha}+t\right)} = 0,$$

ce qui donne, en posant $\frac{u}{\cos.\varphi} = e$

$$\theta = -\frac{k+eb}{2} \pm \frac{k+eb}{2}\sqrt{1 + \frac{4keb}{\left\{\left(\frac{1}{\alpha}+t\right)(k+eb)\right\}^2}(t'-t)}$$

Le développement de l'expression qui est sous le radical donne, lorsque k est très-grand par rapport aux autres quantités qui y entrent, ce qui est le cas ici, une série très-convergente dont les deux premiers termes suffisent pour toutes les valeurs $(t'-t)$ qui peuvent se présenter dans les expériences. On a ainsi pour θ l'expression fort simple :

$$\theta = \frac{kb}{\left(\frac{1}{\alpha}+t\right)\left(\frac{k}{e}+b\right)}(t'-t) \quad (1).$$

Il s'agit d'exprimer maintenant l'élévation de température du fil en fonction de l'élévation de température de l'air du ballon; c'est dans cette portion de son calcul que Riess néglige l'action de l'enveloppe de verre sur l'air qu'elle contient; mais nous avons déjà dit que cette action calorifique est négligeable, car l'abaissement du liquide a lieu dans un temps très-court, et la différence des températures de l'enveloppe et de l'air est toujours extrêmement faible. Soit donc M la masse du fil qui traverse le ballon, C sa chaleur spécifique, m et c les mêmes éléments pour l'air. Quand l'équilibre des températures s'est établi, on a nécessairement la relation suivante :

$$(T-t)\,MC = (t'-t)\,mc, \text{ d'où } T-t = (t'-t)\,\frac{mc+MC}{MC}.$$

Riess remplace ici m par $\frac{\mu b}{1+\alpha t}$, en appelant μ la masse d'air qui remplirait ce même volume du ballon à la température 0° et sous la pression de 1 ligne. En faisant ainsi entrer dans l'expression de m les valeurs de t et de b, il arrive ensuite à pouvoir comparer entre elles les expériences dans lesquelles ces éléments ne sont plus les mêmes. On a donc :

$$T-t = (t'-t)\left(\frac{\mu bc}{MC(1+\alpha t)}+1\right) \quad (2).$$

En éliminant maintenant $(t'-t)$ entre les équations (1) et (2), on arrive à la relation suivante :

$$T-t = \theta\left\{\left(\frac{1}{\alpha}+t\right)\left(\frac{1}{cb}+\frac{1}{k}\right)\left(\frac{\mu bc}{MC(1+\alpha t)}+1\right)\right\} \quad (3),$$

d'après laquelle on voit que l'élévation de température du fil est proportionnel à θ, pourvu que t et b soient constants.

Il est facile, du reste, de montrer que les erreurs qu'on commet en se servant de la formule (3) sont beaucoup moindres que l'erreur inévitable qu'entraîne l'expérience, et que cette erreur dépasse les corrections qu'il faudrait introduire, en supposant que t et b ne fussent pas constants. Il suffit pour cela de différentier successivement l'équation (1) par rapport à b et à t, comme l'a fait Riess; les expressions qu'on trouve pour $d\theta$ confirment complétement notre assertion.

En effet, la différentielle de la valeur de θ par rapport à b est :

$$d\theta = \frac{\frac{\mu c}{MC(1+\alpha t)} - \frac{k}{eb^2}}{\left(\frac{k}{eb}+1\right)\left(\frac{\mu c b}{MC(1+\alpha t)}+1\right)}\,\theta\, db.$$

et elle est par rapport à t :

$$d\theta = \frac{\alpha\,\theta\, dt}{\frac{\mu b c}{MC} + (1+\alpha t)}$$

Dans le cas très-défavorable où un fil de platine de $0^l,1$ de diamètre et de 5^l de longueur serait placé dans le ballon, on a :

1° Si la hauteur barométrique varie de 360 à $360 + db$, $d\theta = 0{,}000355\,\theta\, db$.

2° Pour une variation de température de 15° à $15° + dt$, $d\theta = 0{,}0000095\,\theta\, dt$.

C'est au moyen du thermomètre électrique dont nous venons de donner la théorie, que Riess a établi ses belles lois sur le réchauffement opéré par les décharges électriques. Nous avons rapporté les plus importantes de ces lois dans le corps de l'ouvrage, p. 162 et suiv., et notre intention était de les reproduire toutes ici avec détails; mais nous avons été arrêtés par la nécessité de conserver une juste proportion dans l'étendue à donner à chaque partie du vaste sujet qui fait l'objet de cet ouvrage, pour ne pas dépasser les limites que nous nous sommes imposées. Nous renvoyons donc ceux de nos lecteurs qui désireraient connaître ces détails à l'excellent traité de Riess sur l'électricité de frottement (*Die Lehre von der Raibungs electricität von* P.-T. Riess, Berlin, 1853); il est impossible de présenter d'une manière plus complète cette partie spéciale, mais importante, des phénomènes électriques.

NOTE E (p. 315).

RELATIVE A LA DÉCOMPOSITION ÉLECTROLYTIQUE DES COMPOSÉS COMPLEXES.

Nous n'avons pu donner dans le texte qu'un extrait très-sommaire des recherches de MM. Daniell et Miller sur ce sujet; c'est pourquoi, nous tenons à compléter dans cette note la lacune qui est résultée de la néces-

sité où nous étions, pour ne pas trop allonger, de supprimer tous les développements qui n'étaient pas indispensables.

MM. Daniell et Miller ont fait usage dans leurs expériences de leur appareil à trois cellules, séparées par deux diaphragmes en vessie, et disposé de façon qu'on pouvait recueillir les gaz dégagés dans les deux cellules extrêmes à la surface de deux électrodes de platine qui y plongeaient. Un voltamètre à eau acidulée était dans le circuit pour mesurer la force électromotrice. Les trois cellules étaient remplies, soit du même liquide, soit de liquides différents. Les premiers essais ont porté sur les *phosphates* et ont prouvé que les trois hydrates d'acide phosphorique constituent trois acides essentiellement distincts qui, lorsqu'ils sont dégagés, par l'action voltaïque, de leurs trois combinaisons salines correspondantes, sont transportés dans le circuit comme trois *oxyphosphions* distincts. Ce résultat se déduit d'une manière évidente de la comparaison de l'hydrogène dégagé avec l'acide transporté, dans les cas où l'on soumet successivement à l'électrolyse le phosphate monobasique de soude et les phosphates bibasique et tribasique du même alcali.

Des expériences faites avec des arséniates et des arsénites de potasse, avec des carbonates et des oxalates, avec des sulfates, des sulfites et des hyposulfites, ont confirmé MM. Daniell et Miller dans la manière d'envisager l'électrolyse, à laquelle les avaient conduits leurs premières recherches. Mais l'emploi des dissolutions de ferrocyanure de potassium, celui des sels doubles, tels que les sulfates de cuivre et de potasse, de magnésie et de potasse, leur avaient donné des résultats difficiles à concilier avec les théories reçues de l'électrolyse. Nous ne rapporterons pas ici toutes ces expériences dont on peut trouver le détail dans le Mémoire de MM. Daniell et Miller, inséré dans les *Trans. Phil. de la Soc. R. de Londres de* 1844, 1re *partie*. Nous nous contenterons de donner les conclusions qu'en avaient tirées les auteurs, conclusions qui consistent à distinguer les électrolytes en plusieurs classes, savoir :

1° Ceux qui consistent en *ions* [1] simples ou élémentaires, et qui sont composés d'un simple équivalent de métal ou d'hydrogène pour *cation* [1], et d'un simple équivalent d'un élément non métallique pour *anion* [1] ; ce sont les électrolytes simples ;

2° Ceux qui sont composés d'un simple équivalent d'un *cation* composé qui prend la place du métal et d'un simple équivalent d'un *anion* non métallique ; tel que $Az\,H_4\,Chl.$ (hydrochlorate d'ammoniaque) ;

3° Ceux qui sont composés d'un simple équivalent d'un *anion* composé qui prend la place d'un *anion* élémentaire non métallique et d'un simple

[1] MM. Daniell et Miller appellent, avec Faraday, *ions* les produits de la décomposition électrolytique d'une substance quelconque capable d'être électrolysée, *cations* ceux de ces produits qui se dégagent à l'électrode négatif, et *anions* au positif.

équivalent d'un *cation* élémentaire, métal ou hydrogène; tels que H, Az C, (acide hydrocyanique), K, S O, (sulfate de potasse), etc.;

4° Ceux qui sont composés d'un simple équivalent d'un *cation* composé et d'un simple équivalent d'un *anion* composé, tels que Az H, S O, (sulfate d'ammoniaque).

Ces quatre classes d'électrolytes peuvent être désignées sous le nom d'*électrolytes monobasiques*, vu que pour électrolyser de simples équivalents de ces électrolytes, il suffit d'un équivalent de force électrique tel que le donne l'indication du voltamètre.

Reste une cinquième classe d'électrolytes que les auteurs désignent sous le nom de *polybasiques*; ils se composent de deux ou plusieurs équivalents d'un *cation* métallique (ou hydrogène), ou de simples équivalents de deux ou plusieurs *cations* métalliques (ou hydrogène), tandis que l'*anion* consiste en un simple équivalent d'un *ion* composé; tel est le ferrocyanure de potassium. Dans ce cas et dans celui en général des électrolytes polybasiques, il faut, pour l'électrolyse d'un seul équivalent de l'électrolyte, autant d'équivalents de force électrique qu'il y a d'équivalents de métal ou d'hydrogène dans le *cation*.

Parmi les anomalies signalées par MM. Daniell et Miller, nous citerons la remarque qu'ils ont faite, que ce n'est pas toujours par le transport à chaque électrode d'un demi équivalent exactement du *cation* et de l'*anion* que se fait la décomposition de l'électrolyte; mais il arrive dans quelques cas qu'il y a transport à l'électrode positif d'un équivalent entier de l'*anion*, pendant qu'un équivalent entier du *cation* reste libre à l'électrode négatif; quelquefois il y a transport de plus ou de moins d'un équivalent dans les deux directions opposées, de telle façon, cependant, qu'un équivalent entier de matière se trouve transporté en tout vers l'un ou l'autre électrode. En d'autres termes, il y a toujours transport d'une quantité totale de matière capable d'exercer un équivalent de force chimique; de sorte que, lorsque l'*anion* transporté à l'électrode positif excède un demi équivalent, le *cation* transporté à l'électrode négatif est en moins dans une proportion exactement égale à celle dans laquelle l'*anion* est en plus à l'électrode positif; mais l'*anion* et le *cation* qui sont dégagés à l'état libre à chaque électrode sont toujours en proportions équivalentes. Jamais cependant on n'observe le transport d'un équivalent entier de *cation* avec une absence complète de l'*anion*.

MM. Daniel et Miller croient voir dans les résultats de leurs recherches une objection sérieuse contre les théories moléculaires de l'électrolyse, telles qu'elles ont été formulées par Grotthus et par M. Daniell lui-même, et telles que nous les avons exposées. Nous croyons au contraire que toutes les anomalies ou exceptions apparentes à ces théories que peuvent présenter les faits observés par les savants anglais, s'expliquent très-bien, si on a égard à l'observation si juste de M. d'Almeida que, dans l'électrolyse des dissolutions, il faut tenir compte du pouvoir conducteur

Digitized by Google

des différentes parties du mélange qui forment la dissolution, de telle façon que ce sont les plus conductrices qui sont électrolysées, et que les substances qui se montrent aux électrodes sont souvent des produits secondaires. (Voyez, pour plus de détails, sur les recherches de M. d'Almeida, son Mémoire original, *Annal des Sc. Phys.* (*Bibl. Univ.*), t. XXIX, p. 5, dont nous avons exposé les principaux résultats dans le corps de l'ouvrage, p. 323 et suiv.)

NOTE F.

MÉTHODE DE M. POGGENDORFF POUR LA DÉTERMINATION DE LA FORCE ÉLECTROMOTRICE D'UN COURANT A FORCE NON CONSTANTE.

La méthode de M. Poggendorff diffère essentiellement de toutes les autres, en ce qu'elle mesure non le courant lui-même, mais la tendance à la formation du courant. Or, comme dans les courants à force non constante, c'est l'action du courant lui-même qui donne naissance aux causes perturbatrices qui en détruisent la constance, il est évident que ces causes n'existent plus du moment que le courant n'entre pas en activité. Il s'agit donc de compenser le courant à force non constante par un courant à force constante, et de déduire de la mesure de celui-ci la force électromotrice du premier; l'on ne peut pas, il est vrai, créer des courants hydro-électriques dont les forces électromotrices aient des valeurs déterminées; mais l'on peut, une fois que l'on a une pareille force d'une nature constante, en détourner à volonté une partie aliquote quelconque et l'employer à cette compensation.

Soit A le couple à force constante, B le couple à force non constante; les deux métaux positifs sont joints ensemble au point P, les deux négatifs au point N, et ces deux points de jonction sont réunis par le conducteur O. Considérons les quantités suivantes :

Dans	O	A	B
Force électromotrice	e	e'	e''
Résistance	r	r'	r''
Intensité du courant			
Quand A agit seul	i	i'	i''
Quand B agit seul	i_2	i'_2	i''_2
Quand A et B agissent ensemble	I	I'	I''

D'après le principe que les courants produits par chaque couple s'ajoutent ou se retranchent suivant leurs directions, sans se troubler, on obtient les équations suivantes :

$$\left.\begin{aligned} I &= i + i_2 \\ I' &= i' - i'_2 \\ I'' &= i''_2 - i'' \end{aligned}\right\} (1).$$

Les lois des courants dérivés donnent les deux relations qui suivent, en supposant que le couple A soit seul en activité.

$$i' = i + i''$$

$ir = i'' r'' = h'$, h' désignant l'un quelconque de ces deux produits; de ces deux équations l'on tire $h' = i'\left(\frac{1}{\frac{1}{r}+\frac{1}{r''}}\right)$.

Or $\frac{1}{r}+\frac{1}{r''}$ est la résistance du système conducteur formé par O et le couple B; donc h' représente la force électromotrice dans ce système, d'où il résulte l'équation

$$i' r' + h' = e'.$$

qui exprime que la force électromotrice du circuit est égale à la somme des forces électromotrices des différentes portions longitudinales de ce circuit.

De ces trois équations, on tire les valeurs de i, i' et i'' en faisant pour abréger $s = \frac{1}{r}+\frac{1}{r''}$.

$$i = \frac{e'}{r' s r} \qquad i' = \frac{e'(r' s - 1)}{r' s r'} \qquad i'' = \frac{e'}{r' s r''}$$

On trouve de la même manière les valeurs de i_2, i_2' et i_2'', en supposant que B seul soit en activité.

Les équations (1) deviennent maintenant

$$I = \frac{1}{s r}\left(\frac{e'}{r'}+\frac{e''}{r''}\right)$$

$$I' = \frac{1}{s r'}\left(\frac{e'(s r' - 1)}{r'} - \frac{e''}{r''}\right)$$

$$I'' = \frac{1}{s r''}\left(\frac{e''(s r'' - 1)}{r''} - \frac{e'}{r}\right)$$

Exprimons maintenant que l'intensité du courant dans le couple B est nulle.

$$I'' = 0.$$

ce qui donne :

$$e'' = \frac{r}{r + r'}\, e \quad (1).$$

Substituant cette valeur de e'' dans les deux autres équations, on trouve :

$$I = I' = \frac{e'}{r + r'}$$

et cette relation comparée à la précédente donne :

$$e'' = r\, I \quad (2).$$

Ainsi, au moyen d'un galvanomètre placé dans le circuit de B, on s'assurera qu'à chaque instant on a $I'' = 0$ et on se servira des relations (1) et (2) pour déterminer e'' qui est la force électromotrice du couple à force

non constante. M. Poggendorff, en appliquant chacune de ces deux formules, a été conduit aux deux procédés suivants.

Premier procédé :

Soit B un couple ordinaire de zinc et de cuivre à un seul liquide; on choisit pour A, un couple à force constante et considérable, par exemple un couple de Grove. On fait communiquer, au moyen d'un fil conducteur a, les plaques de zinc des deux couples, et au moyen du fil b, le zinc de B avec le platine de A ; enfin on joint par le fil c, cette plaque de platine avec le cuivre de l'autre couple; le fil c renferme un galvanomètre très-sensible.

Dans cet état de choses, le fil a et les liquides de A donnent la résistance r', le fil b la résistance r, et lorsque ces deux résistances ont entre elles un certain rapport, il n'y a pas de courant dans le fil c, ni par conséquent dans le couple B; on arrive à ce résultat en modifiant peu à peu la longueur de b, jusqu'à ce que l'aiguille du galvanomètre ne dévie plus du 0 et en ayant soin, après chaque approximation, de laisser pendant quelque temps le circuit B ouvert pour faire disparaître toute trace de polarisation. Une fois l'équilibre bien établi, M. Poggendorff mesure la résistance de b avec la plus grande exactitude possible; les éléments du couple de Grove ont été déterminés par les procédés ordinaires, et l'on trouve e'' par la formule $e'' = \frac{r+r'}{r} e'$.

M. Poggendorff a obtenu une vérification de cette méthode en mesurant la force électromotrice d'un couple de Daniell, déjà obtenue par le procédé de Ohm.

$$\text{Méthode de Ohm.} \begin{cases} \text{Grove.} & e' = 25{,}886. \quad \frac{e'}{e''} = 1{,}677. \\ \text{Daniell.} & e'' = 15{,}435. \end{cases}$$

$$\text{Méthode de compensation.} \begin{cases} r' = 35{,}03. \quad \frac{e'}{e''} = \frac{r+r'}{r} = 1{,}668. \\ r = 52{,}68. \end{cases}$$

Second procédé :

On dispose les deux couples de la même manière que précédemment; seulement, il faut introduire dans le fil b un galvanomètre; lorsqu'on s'est assuré que le courant du fil c est annulé, on mesure la résistance de b et l'intensité du courant qui le traverse; si l'on se sert d'une boussole des sinus, en appelant α l'angle de déviation de l'aiguille, on a pour e''.

$$e'' = r \sin \alpha.$$

Ce procédé a sur le premier cet avantage que, α contenant implicitement e' et r', lors même que ces éléments viennent à varier dans l'intervalle des expériences successives, ils entrent toujours dans le calcul avec leurs véritables valeurs, puisque la détermination de α se fait pour chaque expérience ; dans le premier procédé, il faut dans ce cas déterminer de temps en temps la force électromotrice et la résistance du couple à force constante, ce qui nécessite un travail assez long. M. Poggendorff, en compa-

rant ces deux procédés, a montré qu'ils s'accordent avec un grand degré d'exactitude.

NOTE G (p. 760).

RELATIVE A LA THÉORIE MATHÉMATIQUE DE LA PILE.

Nous avons établi, dans le chapitre premier de notre quatrième partie, comme une des lois générales de la propagation de l'électricité, que l'intensité d'un courant dans un circuit fermé est proportionnelle à la somme algébrique des forces électromotrices qui sont développées par une cause quelconque dans les différentes parties de ce circuit (ces forces étant prises avec leurs signes), divisées par la somme des résistances que présente ce circuit : $I = \frac{E}{R}$. Cette loi, que Ohm le premier a énoncée avec cette rigueur mathématique, en la déduisant de considérations *à priori*, a été vérifiée expérimentalement, comme nous l'avons vu, par Fachner pour des circuits hydro-électriques, et par Pouillet, pour ces mêmes circuits, ainsi que pour les circuits thermo-électriques. Mais dans sa généralité, la loi s'applique à toute espèce de circuits aussi bien qu'à ceux que nous venons de désigner, et en particulier aux circuits dans lesquels la force électromotrice est développée par l'action inductrice qu'exerce sur eux, dans une de leur portion plus ou moins longue, l'approche d'un aimant ou d'un courant électrique fermé. Elle est donc indépendante de la nature de la force électromotrice, et par conséquent aussi de toute espèce d'hypothèse qu'on peut faire sur cette nature. On peut avoir un circuit fermé sans qu'il n'y ait encore aucun courant qui y circule ; tel est le cas d'un circuit thermo-électrique dont toutes les parties sont à la même température, d'un circuit destiné à l'induction avant qu'on l'ait soumis à l'action inductrice ; ces circuits possèdent une force de résistance, qu'ils opposeront toujours la même à tout courant qui les parcourra, que ce courant provienne ou d'une force électromotrice qui leur soit extérieure, ou d'une force électromotrice qui soit provoquée dans une ou plusieurs parties d'eux-mêmes, par exemple, en chauffant les points de contact impairs des portions hétérogènes du circuit thermo-électrique, en déterminant l'action inductrice sur une certaine portion du circuit destiné à être induit.

On trouve dans le *Traité de Physique* de M. Pouillet[1] l'exposition détaillée des expériences et des calculs très-simples, au moyen desquels ce savant physicien est parvenu à établir la formule générale de l'intensité d'une pile composée d'un nombre n de couples, dont l'intensité et la résistance individuelles sont données. Il faut en outre connaître la résistance a des conducteurs communs dans laquelle est comprise celle du

[1] *Éléments de physique expérimentale et de météorologie*, par M. Pouillet. 6e édition, 1853, t. I, p. 631 et suiv.

galvanomètre à sinus ou à tangente destiné à mesurer l'intensité du courant de chaque couple, et ensuite de la pile entière, et la résistance l du fil qu'on ajoute au circuit; toutes ces résistances sont données en longueurs réduites d'un même fil de cuivre. M. Pouillet arrive ainsi à cette formule générale : $\frac{\Sigma r i}{\Sigma r - a(n-1) + l}$, dans laquelle $\Sigma r i$ exprime la somme des produits de i_1 et r_1, de i_2 et r_2 etc., i_1 et r_1 étant l'intensité et la résistance individuelles du premier couple, i_2 et r_2 celles du second, etc., Σr étant la somme des résistances $r_1 r_2$, etc., de chaque couple. Il est facile de voir que $\Sigma r i$ est la somme des forces électromotrices e_1 e_2 des couples, puisque $i_1 = \frac{e_1}{r_1}$ et par conséquent $i_1 r_1 = e_1$. Ainsi la formule générale établie par M. Pouillet, au moyen d'expériences directes, est toujours la même que $\frac{E}{R+l}$. Il faut seulement faire attention ici que M. Pouillet retranche de la somme des résistances Σr ou R, autant de fois la résistance du conducteur commun (galvanomètre qui a servi à la mesure) qu'il y a de couples moins un, ce qui tient à ce que la résistance de chaque couple a été déterminée individuellement au moyen de ce galvanomètre mis dans son circuit, lequel se retrouve bien dans le circuit de la pile entière, mais une fois seulement, et non pas n fois, c'est-à-dire non pas autant de fois qu'il y a de couples. Il faut donc retrancher cette résistance, qui se trouve implicitement comprise dans celle de chaque couple, autant de fois qu'il y a de couples dans la pile moins un.

En opérant ainsi, M. Pouillet trouve un accord complet entre les valeurs que l'expérience directe lui donne pour l'intensité du courant de piles composées d'un plus ou moins grand nombre de couples, et celles qu'il tire de la formule en y introduisant les valeurs numériques que l'expérience lui avait données pour l'intensité et la résistance individuelles de chacun des couples dont la pile est formée.

Dans le cas ordinaire où les couples de la pile ont tous la même intensité, la formule devient : $\frac{n r i}{n r - a(n-1) + l}$, et si a est très-petit par rapport à r, ce qui peut arriver facilement, elle devient : $\frac{n r i}{n r + l}$. Si on exprime l en fraction de r de manière qu'on ait $l = p r$, la formule devient : $\frac{n i}{n+p}$; et si p est très-petit par rapport à n, c'est-à-dire si le conducteur qu'on ajoute au circuit ou, ce qui revient au même, qui réunit les pôles de la pile est très-bon, soit par sa nature, soit par ses dimensions, et qu'en même temps le nombre des couples soit très-grand, alors la formule devient : $\frac{n i}{n}$ ou i, c'est-à-dire que l'intensité de la pile est égale à celle d'un couple; tel est le cas par exemple, comme nous l'avons vu

(p. 502 et suiv.), d'une pile thermo-électrique composée d'un certain nombre de couples semblables ajoutés bout à bout de manière à former à eux seuls le circuit complet, sans conducteur interposé, car alors on a $p = o$. Si au contraire p est très-grand par rapport à n, c'est-à-dire si le conducteur interposé est un fil fin et long, ou un liquide qui présente une grande résistance, tandis que d'un autre côté r ou la résistance de chaque couple est petite, alors n disparaît devant p et la formule devient $\frac{n\,i}{p}$; c'est-à-dire que l'intensité de la pile est proportionnelle au nombre de ses couples; ce cas se réalise exactement quand $p = \frac{1}{o}$; c'est-à-dire quand les pôles de la pile sont isolés, la tension de chacun d'eux est alors en effet exactement proportionnelle au nombre des couples. Du reste, les deux cas extrêmes que nous venons de supposer sont les deux limites entre lesquelles l'intensité d'une pile quelconque est nécessairement comprise; dans les cas ordinaires, cette intensité a donc une valeur comprise entre ces limites[1].

Après ce coup d'œil général sur les lois mathématiques qui régissent l'intensité des courants, venons-en à savoir comment on peut connaître ou obtenir le maximum d'effet utile d'une pile. Nous suivrons pour cela la méthode décrite par M. Poggendorff, méthode dont nous avons déjà indiqué les résultats dans le corps de l'ouvrage (p. 760).

On a $i = \frac{e}{r+l}$, en appelant e la force électromotrice d'un couple, r la résistance de ce couple (résistance *essentielle* et constante du circuit), et l la résistance accessoire et variable extérieure au couple; en appelant m le maximum d'intensité du courant, on a $m = \frac{e}{r}$. On peut approcher de ce maximum, soit en annulant autant que possible la résistance l, en employant pour fermer le circuit un conducteur aussi bon que possible, soit en rendant n aussi grand que possible, c'est-à-dire en construisant une pile composée d'un aussi grand nombre de couples que possible, ce qui fait

[1] C'est à tort, suivant nous, que M. Pouillet appelle le cas *le plus défavorable*, celui où l'intensité de la pile n'est ni plus ni moins grande que celle d'un couple, et le cas *le plus favorable*, celui où elle est proportionnelle au nombre des couples. En effet, dans le premier cas, son intensité est $\frac{n\,e}{e} = e$, et dans le second $\frac{n\,e}{p} < e$, puisqu'on n'obtient $\frac{n\,e}{p}$ pour la valeur de l'intensité de la pile qu'en faisant p infiniment grand par rapport à n. Il est vrai que dans ce second cas, l'intensité est d'autant plus grande que le nombre des couples est plus considérable; mais l'existence de ce rapport entre l'intensité et le nombre des couples n'influe en rien sur la valeur absolue de cette intensité.

que dans l'expression $I = \frac{ne}{nr+l}$, l disparait devant nr et on a $I = \frac{e}{r} = m$.

Si on a un second circuit dont les éléments correspondants à ceux du premier soient e', r', l', i', on a d'une manière générale l'expression suivante pour le rapport des intensités des courants des deux circuits :

$$\frac{i}{i'} = \frac{e}{e'} \cdot \frac{r'+l'}{r+l}.$$

Si l'on suppose $l = l'$ et qu'on fasse $l = o$, puis $l = \frac{1}{o'}$, on aura dans le premier cas : $\frac{i}{i'} = \frac{e}{e} \cdot \frac{r'}{r}$ et dans le second $\frac{i}{i'} = \frac{e}{e'}$.

La première limite est le rapport des courants maximum, puisque $m = \frac{e}{r}$ et $m' = \frac{e'}{r'}$. La seconde limite est le rapport des forces électromotrices. Ces deux limites sont elles-mêmes entre elles inversément comme les résistances essentielles des deux circuits.

Le rapport des courants maximum est en même temps celui des intensités de deux courants voltaïques par lesquelles on obtient, avec ces courants, le maximum d'effet utile; et c'est ici que vient la solution de la question : étant données deux surfaces métalliques (zinc amalgamé et platine, par exemple), en combien de couples doit-on les diviser pour avoir une pile qui produise le maximum d'effet dans un voltamètre chimique ou calorifique placé dans son circuit? La distance qui doit exister entre les plaques des couples, le liquide ou les liquides dont on doit se servir, sont aussi donnés.

L'effet chimique du courant étant proportionnel à son intensité et son effet calorifique au carré de son intensité, l'effet utile sera donc, dans ces cas, le plus grand possible quand l'intensité du courant sera maximum. Soit donc l la résistance du voltamètre [1], λ la résistance du liquide qui entre dans la formation de la pile, pour l'unité de section et pour une longueur égale à la distance entre les plaques de chaque couple, σ la grandeur de la surface à donner à chaque plaque et par conséquent la grandeur de la section du liquide, et s la grandeur de l'une des deux surfaces métalliques données qui sont égales entre elles. Dans l'expression générale,

Le voltamètre peut être un voltamètre calorifique, c'est-à-dire un fil fin de platine qu'on met dans le circuit et dont on mesure le réchauffement; dans ce cas l est la résistance de ce fil quand il est arrivé à la température que lui imprime le passage du courant électrique. Le voltamètre peut être un voltamètre chimique, et alors la résistance l est celle qui résulte de l'ensemble des causes (y compris les polarités secondaires) qui diminuent l'intensité du courant dans le circuit duquel est le voltamètre, et qui peut toujours être représentée par la longueur plus ou moins considérable d'un fil métallique.

$I = \frac{ne}{nr + l}$, on a : $r = \frac{\lambda}{\sigma}$, puisque la résistance du couple doit être directement proportionnelle à celle du liquide dont le couple est chargé, et inversément proportionnelle à la section du liquide; on a d'un autre côté $n = \frac{s}{\sigma}$, ce qui donne $r = \frac{n\lambda}{s}$; remplaçant r par sa valeur dans l'expression de I, on a :

$$I = \frac{nes}{n^2\lambda + sl}$$

de sorte que l'intensité du courant est exprimée en fonction de la seule variable n.

Il n'y a donc plus qu'à chercher quelle est la valeur de n qui rendra cette expression un maximum, et pour cela, il faut égaler sa dérivée à o, ce qui donne :

$$es(n^2\lambda + sl) - 2n^2\lambda es = 0$$

d'où l'on tire :

$$n^2 = \frac{sl}{\lambda} \text{ ou } l = \frac{n^2\lambda}{s} = nr, \text{puisque } r = \frac{n\lambda}{s}.$$

Ainsi l'intensité du courant est à son maximum, quand le nombre des couples est tel que la résistance intérieure de la pile est égale à celle que le courant doit surmonter extérieurement dans l'un ou l'autre des voltamètres. On a par conséquent pour la valeur du maximum d'effet utile (qui est ici la même chose que le maximum d'intensité du courant) :

$$I = \frac{ne}{nr + nr} = \frac{e}{2r}$$

On trouve ainsi que l'intensité du courant, pour le cas du maximum d'effet utile, est égale au demi maximum d'intensité absolue que le courant de la pile ou celui de l'un de ses couples peut atteindre, et qui a lieu dans le cas où la résistance extérieure est nulle.

On arrive exactement au même résultat dans la solution d'une autre question, celle où il s'agit de savoir quelle doit être la longueur et le diamètre d'un fil conducteur dont le volume est donné [1], pour obtenir le maximum d'action magnétique avec une pile voltaïque donnée. — Si on appelle t la longueur et s la section du fil dont la résistance est représentée par l dans la formule générale, v le volume donné du fil, on a, en supposant que la résistance du fil soit 1 pour l'unité de longueur et de section, $v = ts$ et $l = \frac{t}{s}$ d'où $l = \frac{t^2}{v}$.

[1] En général l'espace qui doit être rempli par le fil métallique est donné dans la plupart des cas (par exemple dans les galvanomètres et dans les machines électro-magnétiques), espace qu'on peut remplir par un fil gros et court, ou mince et long ; il s'agit de savoir les dimensions qu'il faut lui donner pour avoir le maximum d'effet utile.

Si on remplace l par sa valeur dans la formule générale, on a :

$$I = \frac{nve}{nvr + l^2}.$$

Mais pour avoir l'effet utile dans ce cas, il faut multiplier I par l longueur du fil, parce que l'action électro-dynamique d'un fil traversé par le courant électrique est proportionnelle au produit de l'intensité du courant par la longueur du fil, ce qui donne :

$$Il = \frac{nvel}{nvr + l^2}.$$

En différentiant cette équation par rapport à n pour trouver le cas dans lequel Il a une valeur maximum, on trouve que cette valeur maximum a lieu quand $l^2 = nvr$ ou, puisque $l^2 = vl$, quand $l = nr$, c'est-à-dire quand la longueur et la section du fil sont tels que sa résistance l soit égale à la résistance intérieure de la pile; résultat semblable à celui que nous avons trouvé dans le cas précédent, et d'où l'on tire également pour la valeur de l'intensité du courant dans le cas du maximum d'effet utile : $I = \frac{e}{2r}$.

FIN DU DEUXIÈME VOLUME.

Digitized by Google

TABLE DES MATIÈRES

DU DEUXIÈME VOLUME.

AVERTISSEMENT. V
Errata. VIII

QUATRIÈME PARTIE.

TRANSMISSION DE L'ÉLECTRICITÉ.

CHAPITRE I. — **Propagation de l'électricité** 1

§ 1. Notions générales sur la propagation de l'électricité 1
§ 2. Lois de la propagation de l'électricité dans les bons conducteurs. 8
§ 3. Conductibilité électrique des solides et des liquides 33
§ 4. Propagation de l'électricité dans les conducteurs imparfaits solides et liquides. 63
§ 5. Propagation de l'électricité dans les fluides élastiques . . . 83
§ 6. Considérations générales sur le mode de transmission de l'électricité dans les corps et dans le vide, et sur quelques phénomènes moléculaires qui en sont la conséquence. 109
§ 7. Vitesse de propagation de l'électricité 123

CHAPITRE II. — **Effets calorifiques et lumineux de l'électricité dynamique.** 142

§ 1. Formes et conditions sous lesquelles la chaleur et la lumière sont produites par l'électricité dynamique 142
§ 2. Effets calorifiques produits par le passage de l'électricité dynamique à travers de bons conducteurs. 144
§ 3. Lois qui régissent les effets calorifiques des décharges dans les bons conducteurs. 154
§ 4. Lois des effets calorifiques produits par le passage des courants continus à travers de bons conducteurs 173
§ 5. Incandescence et fusion des métaux par l'électricité dynamique, et effets moléculaires qui les accompagnent 193
§ 6. Effets calorifiques et lumineux des décharges à travers des conducteurs imparfaits. 203
§ 7. Effets calorifiques et lumineux des courants électriques à travers les conducteurs imparfaits. — Arc voltaïque 220
§ 8. Considérations générales sur la chaleur et la lumière électrique. — Propriétés spéciales de cette lumière. 243

CHAPITRE III. — **Effets chimiques de l'électricité dynamique.** 277

§ 1. Décompositions opérées par le courant voltaïque 277
§ 2. Lois des décompositions électro-chimiques. — Action définie du courant 293
§ 3. Exceptions apparentes aux lois de l'électrolyse et confirmation de ces lois. 315
§ 4. Influence des électrodes sur les décompositions électro-chimiques. 334
§ 5. Mouvements produits dans les liquides électrolytiques par le passage du courant. 363
§ 6. Effets chimiques de l'électricité ordinaire et de l'étincelle électrique 381
§ 7. Production et propriétés de l'ozone 407

CHAPITRE IV. — **Effets physiologiques que l'électricité dynamique exerce sur les corps organisés.** 422

§ 1. Nature des effets que l'électricité dynamique exerce sur les corps organisés 422
§ 2. Analyse fondamentale de l'action du courant électrique sur les animaux 433

CINQUIÈME PARTIE.

SOURCES DE L'ÉLECTRICITÉ.

CHAPITRE I. — **Électricité produite par l'action de la chaleur** 456

§ 1. Développement de l'électricité par l'action calorifique dans les mauvais conducteurs 456
§ 2. Dégagement d'électricité par l'action calorifique dans les corps bons conducteurs. — Courants thermo-électriques . . . 473
§ 3. Rapport entre la thermo-électricité et la structure moléculaire des corps. 487
§ 4. Piles thermo-électriques et application de la thermo-électricité à la mesure des températures. 501
§ 5. Rapprochement entre les effets calorifiques du courant et les phénomènes thermo-électriques. — Essai de théorie. . . 519

CHAPITRE II. — **Électricité produite par les actions mécaniques** 534

§ 1. Développement de l'électricité par le frottement des corps solides isolants 534
§ 2. Dégagement de l'électricité dans le frottement des corps en poudre, des liquides et des gaz. — Machine hydro-électrique. 558
§ 3. Dégagement de l'électricité dans le frottement de deux corps bons conducteurs. 571
§ 4. Dégagement de l'électricité dans les actions mécaniques autres que le frottement. 575

§ 5. Considérations générales sur le dégagement de l'électricité par les actions mécaniques et sur ses rapports avec le dégagement de la chaleur. 583

CHAPITRE III. — **Électricité produite par les actions chimiques** 590

§ 1. Production d'électricité par l'action chimique des liquides sur les solides. — Couple et pile voltaïque 590

§ 2. Production d'électricité dans l'action chimique des dissolutions les unes sur les autres 634

§ 3. Production d'électricité dans l'action chimique des liquides sur les couches minces dont sont recouvertes des surfaces solides. — Polarités secondaires, pile à gaz, fer passif. 654

§ 4. Production d'électricité dans la combustion et par l'action combinée de la chaleur et de l'affinité chimique. 684

§ 5. Application des principes qui précèdent, à la construction et à la théorie des différentes piles voltaïques. 699

§ 6. Mesure de la force électro-motrice relative des diverses combinaisons voltaïques. 721

§ 7. Électricité de contact. — Piles sèches 767

§ 8. Rapport entre l'électricité et les actions chimiques. — Théories électro-chimiques. 795

NOTES

RELATIVES AUX DÉVELOPPEMENTS MATHÉMATIQUES DE QUELQUES POINTS PARTICULIERS.

NOTE **A**. Relative à la propagation de l'électricité. 829

NOTE **B**. Relative aux courants dérivés. 834

NOTE **C**. Relative aux lois des décharges des batteries électriques. . 838

NOTE **D**. Relative au thermomètre électrique et au réchauffement des fils par le passage de l'électricité dynamique. 840

NOTE **E**. Relative à la décomposition électrolytique des composés complexes. 842

NOTE **F**. Méthode de M. Poggendorff pour la détermination de la force électromotrice d'un courant à force non constante. . . 845

NOTE **G**. Relative à la théorie mathématique de la pile. 848

FIN DE LA TABLE.

5682537

Paris. — Imprimerie de GUSTAVE GRATIOT, rue Mazarine, 30.

Digitized by Google